

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Stjepan Križan

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Krešimir Vučković

Student:

Stjepan Križan

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Krešimiru Vučkoviću na ukazanom povjerenju prihvatanjem mentorstva za ovaj rad, korisnim savjetima i kritičnom pristupu u konačnom oblikovanju rada.

Posebnu zahvalu dugujem svojim roditeljima i obitelji na potpori koju su mi pružili tokom mog cjelokupnog školovanja.

Stjepan Križan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Stjepan Križan**

Mat. br.: 0035157419

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Uređaj za ispitivanje brtvljenja prirubničkog spoja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Flange joint sealing testing device**

Opis zadatka:

Prirubnički spojevi omogućavaju međusobno spajanje cijevi. Uslijed opterećenja cjevovoda vlastitom težinom, snijegom, ledom, vjetrom kao i montažnih opterećenja uslijed nepodudarnosti osi cijevi, ovi spojevi su opterećeni na savijanje. Zbog navedenog dolazi do promjene u raspodjeli dodirnog pritiska na brtvi što može prouzročiti probleme s propuštanjem.

Potrebno je koncipirati i konstrukcijski razraditi uređaj za ispitivanje brtvljenja prirubničkog spoja opterećenog unutarnjim tlakom i vanjskim statičkim savojnim opterećenjem pri sobnoj temperaturi. Opterećenje unutarnjim tlakom potrebno je izvesti dobavom tlačnog medija. Uređaj mora imati mogućnost podešavanja razmaka između dvaju simetrično postavljenih oslonaca cijevi te mogućnost unošenja vanjskog statičkog savojnog opterećenja, a potrebno ga je dimenzionirati prema sljedećim podacima:

- prirubnica s grlom: DN50 PN40 prema normi EN 1092-1
- materijal prirubnice: X2CrNi19-11
- materijal brtve: PTFE
- vanjski statički moment savijanja: od 0 do 1000 Nm
- razmak među osloncima cijevi: od 400 do 1400 mm.

Tijekom razrade u obzir treba uzeti sljedeće:

- predvidjeti pozicije pretvornika za mjerenje unutarnjeg tlaka i sile u vijcima prirubničkog spoja,
- predvidjeti poziciju priključka za dobavu tlačnog medija.

U radu je potrebno provesti i proračun prirubničkog spoja prema normi EN 133445-3.

Vrijednosti potrebne za proračun i odabir pojedinih komponenti usvojiti iz postojećih rješenja sličnih uređaja, iskustvenih vrijednosti te u dogovoru s mentorom. Kompletno konstrukcijsko rješenje razraditi do razine radioničkih crteža. U radu navesti korištenu literaturu, norme i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:

13. rujna 2012.


Rok predaje rada:

15. studenog 2012.


Predviđeni datumi obrane:

21. i 22. studenog 2012.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Krešimir Vučković

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	VII
POPIS OZNAKA	VIII
SAŽETAK.....	XIII
1 UVOD.....	1
2 Prirubnički spojevi.....	2
2.1 Problemi prirubničkih spojeva	3
2.1.1 Najčešći uzroci propuštanja prirubničkih spojeva mogu biti:.....	4
2.1.1.1 Nejednaka sila na vijcima	4
2.1.1.2 Nepravilna pozicija prirubnica.....	5
2.1.1.3 Nepravilna pozicija brtvenog elementa	5
2.1.1.4 Prljave ili oštećene površine prirubnica.....	6
2.1.1.5 Prekomjerna opterećenja u cijevnom sustavu na mjestu prirubnica.....	6
2.1.1.6 Termalni šok	6
2.1.1.7 Nepravilna specifikacija i veličina brtvenog elementa	6
2.1.1.8 Vibracije.....	7
3 ANALIZA POSTOJEĆIH RJEŠENJA I EKSPERIMENATA	8
3.1 Kombinirani utjecaj vanjskog opterećenja na standardne i kompaktne prirubnice [4]	8
3.1.1 Zaključak i rezultati eksperimenta	11
3.2 Studija prirubničkih spojeva opterećenih savojnim momentom s anisotropnim „Hill“ modelom za brtveni element [7]	12
3.2.1 Zaključak i rezultati eksperimenta	13
3.3 Zaključak analize	13
4 PRORAČUN	14
4.1 Ulazni podaci	15
4.1.1 Prirubnica.....	15
4.1.2 Brtva.....	17

4.1.3	Sile, momenti, tlak	17
4.1.4	Vijci na prirubnici	18
4.2	Efektivna širina brtve	19
4.2.1	Prva iteracija	19
4.2.1.1	Krakovi djelovanja sila	21
4.2.1.2	Sile	22
4.2.1.3	Faktori propusnosti sklopa u ispitnom stanju	22
4.2.1.4	Minimalne potrebne sile na prirubničkom spoju	24
4.2.2	Druga iteracija	25
4.2.2.1	Krakovi djelovanja sila	27
4.2.2.2	Sile	27
4.2.2.3	Faktori propusnosti sklopa u ispitnom stanju	28
4.2.2.4	Minimalne potrebne sile prirubničkog spoja	29
4.3	Rasipanje sile vijaka	31
4.4	Sile vijaka i brtve prilikom sklapanja prirubničkog spoja	31
4.5	Sile brtve i vijaka u pogonskom (ispitnom) stanju	32
4.6	Sigurnost spoja	33
4.6.1	Sigurnost vijaka	33
4.6.2	Sigurnost brtve	34
4.6.3	Sigurnost prirubnice	35
4.6.3.1	Određivanje faktora ψ_Z i k_M	36
4.7	Stežanje momentnim ključem	38
4.8	Rotacije prirubnica	39
4.9	Izračunane vrijednosti prirubničkog spoja	41
5	FUNKCIJSKA STRUKTURA I MORFOLOŠKA MATRICA	43
5.1	Funkcijska struktura	43
5.2	Morfološka matrica	44
6	GENERIRANJE KONCEPATA I RJEŠENJA	47
6.1	Koncept 1	47
6.2	Koncept 2	48
6.3	Koncept 3	49

6.4	Koncept 4	50
6.5	Koncept 5	51
6.6	Koncept 6	52
6.7	Zaključak i odabir rješenja za daljnju razradu	53
6.8	Morfološka matrica odabranog rješenja	54
7	ANALIZA ODABRANOG KONCEPTA	57
7.1	Prirubnički spoj	57
7.2	Uređaj za ispitivanje prirubničkog spoja	58
7.2.1	Varijabilnost uređaja	59
7.2.2	Oslonci	61
7.2.3	Uređaj za unos momenta	62
7.2.4	Proračun uz rješenje	63
7.2.4.1	Potrebna sila vijčanog spoja i reakcije u osloncima	63
7.2.4.2	Izvijanje vijčanog spoja	64
7.2.4.3	Maksimalno ostvarivi moment prema dopuštenom naprezanju cijevi	67
7.2.4.4	Kontrola sigurnosti vijaka oslonaca	68
7.2.4.5	Kontrola osovine	69
8	ZAKLJUČAK	71
	PRILOZI	72
	LITERATURA	73

POPIS SLIKA

Slika 1. Prirubnički spoj	2
Slika 2. Tipovi prirubnica i naliježućih površina prirubnica (izvadak) prema EN 1092-1:2008-09 [2] .	3
Slika 3. Križni redoslijed pritezanja prirubnice sa 8 vijaka.....	4
Slika 4. Dijagram istezanja pojedinačnih vijaka prilikom pritezanja prirubničkog spoja momentnim ključem [3].....	5
Slika 5. Osnovni princip rada uređaja za ispitivanje [4]	9
Slika 6. ANSI prirubnički spoj opterećen unutarnjim tlakom, savojnim momentom i aksijalnom silom [4].....	10
Slika 7. Ispitna naprava [7].....	12
Slika 8. Opterećenja prirubnice	14
Slika 9. Oznake na prirubnici prema [11]	15
Slika 10. Oznake na brtvi prema [11].....	17
Slika 11. Oznake na vijcima karakteristične za proračun prema [11]	18
Slika 12. Sile i krakovi djelovanja sila	41
Slika 13. Funkcijska struktura	43
Slika 14. Koncept 1	47
Slika 15. Koncept 2	48
Slika 16. Koncept 3	49
Slika 17. Koncept 4	50
Slika 18. Koncept 5	51
Slika 19. Koncept 6	52
Slika 20. Prirubnički spoj	57
Slika 21. Odabrani razrađeni koncept	58
Slika 22. Prostorni pogled odabranog koncepta	59
Slika 23. Aksijalna varijabilnost konstrukcijskih elemenata.....	60
Slika 24. Varijabilnost prirubničkih spojeva	60
Slika 25. Slobodni oslonac	61
Slika 26. Presjek vijčanog uređaja za unos sile.....	62
Slika 27. Skica opterećenja, dijagram poprečnih sila, dijagram momenta savijanja.....	63

Slika 28. Vijčani spoj	65
Slika 29. Slučaj opterećenja na izvijanje za vijčani spoj prema [14]	65
Slika 30. Skica opterećenja oslonca	69
Slika 31. Skica opterećenja osovine	69

POPIS TABLICA

Tablica 1. Najčešći uzroci propuštanja medija na odobalnim (<i>offshore</i>) platformama [1]	1
Tablica 2. Dimenzije zadane prirubnice DN50 PN40 [2]	15
Tablica 3. Specifikacije materijala X2CrNi19-11	16
Tablica 4. Dimenzije i specifikacije materijala brtve (PTFE) prema [11]	17
Tablica 5. Zadane vrijednosti opterećenja prirubničkog spoja.....	18
Tablica 6. Vrijednosti odabranih vijaka	18
Tablica 7. Dobivene vrijednosti prirubničkog spoja prilikom sklapanja.....	41
Tablica 8. Dobivene vrijednosti prirubničkog spoja u ispitnom stanju	42
Tablica 9. Morfološka matrica	44
Tablica 10. Morfološka matrica odabranog rješenja (koncept 6).....	54
Tablica 11. Vrijednosti vijka M16, materijala 11SMn30	66
Tablica 12. Vrijednosti vijka M12, kvalitete 8.8.....	68

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

2012/13-000	UREĐAJ ZA ISPITIVANJE BRTVLJENJA PRIRUBNIČKOG SPOJA
2012/13-001	I PROFIL – HEB 120
2012/13-002	OSLONAC
2012/13-003	NOSAČ OSOVINE
2012/13-004	OSLONAC ZA VIJČANI SKLOP
2012/13-005	VIJAK ZA UNOS SILE
2012/13-006	SEDLO
2012/13-007	OSOVINA
2012/13-008	NOSAČ KLIZNOG LEŽAJA
2012/13-009	PLOČICA PROTIV ROTACIJE
2012/13-010	NOSAČ CIJEVNOG SPOJA - DONJI
2012/13-011	NOSAČ CIJEVNOG SPOJA - GORNJI
2012/13-012	NOSAČ CIJEVNOG SPOJA - DONJI
2012/13-013	NOSAČ CIJEVNOG SPOJA - GORNJI
2012/13-014	KLIZNA PLOČICA
2012/13-015	KLIZNI PRSTEN
2012/13-016	ZAVARENI SKLOP ZA ISPITIVANJE
2012/13-017	ZAVARENI SKLOP ZA ISPITIVANJE

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_B	mm^2	efektivna površina svih vijaka prirubnice
A_{Bk}	mm^2	površina presjeka jezgre vijka
A_F	mm^2	površina presjeka prirubnice
A_{Ge}	mm^2	efektivna kontaktna površina brtve
A_{Gt}	mm^2	teorijska kontaktna površina brtve
b_F	mm	efektivna širina prirubnice
b_{Ge}	mm	efektivna širina brtve
b_{Gi}	mm	privremena širina brtve
b_{Gt}	mm	teorijska širina brtve
c_F		korekcijski faktor prirubnice
c_G		korekcijski faktor brtve
C_M		korekcijski faktor prirubnice
C_S		korekcijski faktor prirubnice
d	mm	vanjski promjer
D	mm	unutarnji promjer cijevi
d_0	mm	unutarnji promjer prirubnice
d_1	mm	srednji promjer prirubnice (tanji dio)
d_2	mm	srednji promjer prirubnice (deblji dio)
d_3	mm	promjer kružnice vijaka prirubnice
d_{3e}	mm	efektivni promjer kružnice vijaka prirubnice
d_4	mm	vanjski promjer prirubnice
d_5	mm	promjer prolaznih provrta za vijke na prirubnici
d_{5e}	mm	efektivni promjer provrta vijaka
d_{B0}	mm	nazivni promjer vijka
d_{B2}	mm	srednji promjer bokova vijka
d_{B3}	mm	promjer jezgre vijka
d_{Be}	mm	srednji efektivni promjer vijka
d_E	mm	ekvivalentni srednji promjer konusnog prstena prirubnice
d_F	mm	srednji promjer prstena prirubnice
d_{G1}	mm	unutarnji promjer brtve
d_{G2}	mm	vanjski promjer brtve
d_{Ge}	mm	efektivni srednji promjer brtve

d_{Gt}	mm	teorijski srednji promjer brtve
E_0	MPa	kompresijski modul elastičnosti bez opterećenja
e_1	mm	minimalna debljina stjenke prirubnice
e_2	mm	debljina stjenke prirubnice na radijusu
E_B	GPa	modul elastičnosti materijala vijka
E_{BI}	GPa	modul elastičnosti vijka u ispitnom stanju
e_D	mm	ekvivalentna debljina prstena prirubnice
e_E	mm	ekvivalentna debljina konusnog prstena prirubnice
e_F	mm	efektivna aksijalna debljina prirubnice
E_{F0}	GPa	modul elastičnosti prirubnice u stanju sklapanja
E_{FI}	GPa	modul elastičnosti prirubnice u ispitnom stanju
e_G	mm	aksijalna debljina brtve
E_{GI}	MPa	modul elastičnosti brtve u ispitnom stanju
E_{Gm}	MPa	efektivni modul elastičnosti brtve
e_P	mm	aksijalna debljina prirubnice
F_{A0}	N	vanjska sila prilikom sklapanja prirubničkog spoja
F_{AI}	N	vanjska sila prirubničkog spoja u ispitnom stanju
F_{Az}	N	sila oslonca A u z smjeru
F_{B0}	N	sila vijaka prilikom sklapanja
f_{B0}	MPa	dopušteno naprezanje vijka prilikom sklapanja
$F_{B0,max}$	N	maksimalna sila vijaka prilikom sklapanja
$F_{B0,min}$	N	minimalna sila vijaka prilikom sklapanja
$F_{B0,nom}$	N	nominalna sila vijaka prilikom sklapanja
F_{BI}	N	sila vijaka u ispitnom stanju
f_{BI}	MPa	dopušteno naprezanje vijka u ispitnom stanju
$F_{BI,max}$	N	maksimalna sila vijaka u ispitnom stanju
$F_{BI,min}$	N	minimalna sila vijaka u ispitnom stanju
F_{Bx}	N	sila oslonca B u x smjeru
F_{Bz}	N	sila oslonca B u z smjeru
f_E	MPa	dopušteno naprezanje prirubnice
f_F	MPa	dopušteno naprezanje prirubnice
F_{G0}	N	sila brtvljenja prilikom sklapanja
$F_{G0,d}$	N	konstrukcijska sila brtve
$F_{G0,max}$	N	maksimalna sila brtvljenja (sklapanje)
$F_{G0,min}$	N	minimalna potrebna sila brtvljenja (sklapanje)
$F_{G0,req}$	N	potrebna sila brtvljenja
F_{GI}	N	sila brtve u ispitnom stanju
$F_{GI,max}$	N	maksimalna sila brtvljenja u ispitnom stanju
$F_{GI,min}$	N	minimalna potrebna sila za brtvljenje u ispitnom stanju

$F_{G\Delta}$	N	minimalna potrebna sila u vijcima prilikom pritezanja
$F_{I,dop}$	N	dopuštena sila izvijanja
F_k	N	kritična sila izvijanja
F_{max}	N	maksimalna sila vijčanog spoja
F_{pot}	N	potrebna sila vijčanog spoja
F_{R0}	N	početna vanjska sila prilikom sklapanja prirubničkog spoja
F_{RI}	N	vanjska rezultatna sila u ispitnom stanju
f_s	MPa	dopušteno naprezanje stjenke prirubnice
g_C		faktor puzanja brtve
h_G	mm	krak djelovanja sile brtvljenja
h_{G0}	mm	krak djelovanja sile brtvljenja
h_H	mm	krak djelovanja rezultatne sile
h_P	mm	faktor korekcije momentnog kraka
h_Q	mm	faktor korekcije momentnog kraka
h_R	mm	korekcija momentnih krakova prirubnice
h_S	mm	korekcija momentnih krakova prirubnice
h_T	mm	korekcija momentnih krakova prirubnice
I_{min}	mm ⁴	minimalni aksijalni moment tromosti
j_M		predznak (signum) funkcija momenta
K_1		omjer promjene modula elastičnosti brtve sa kompresijskim opterećenjem
k_B		pomoćni faktor za izračun nominalnog momenta
k_Q		korekcijski faktor prirubnice
k_R		korekcijski faktor prirubnice
l_0	mm	slobodna duljina izvijanja
l_B	mm	konstrukcijska udaljenost vijka i matice na prirubnici
l_H	mm	duljina konusnog prstena prirubnice
M_{A0}	N	vanjski moment prilikom sklapanja prirubničkog spoja
M_{AI}	N	vanjski moment prirubničkog spoja u ispitnom stanju
$M_{f,max}$	Nm	maksimalni savojni moment
$M_{I,max}$	Nm	maksimalni dopušteni savojni moment prirubničkog spoja prema dopuštenoj sili izvijanja
M_{pot}	Nm	potrebni savojni moment prirubničkog spoja
m_t		kompresijski faktor brtve
$M_{t,nom}$	Nm	nominalni moment momentnog ključa
n_B		broj vijaka prirubnice
N_R		broj rastavljanja sklopa unutar radnog vijeka prirubnice
P	bar	nazivni tlak
P_I	bar	tlak testiranja
p_t	mm	korak između vijaka prirubnice

p_t	mm	korak navoja vijka
Q	MPa	srednje (postojeće naprezanje brtve)
$Q_{0,min}$	MPa	minimalno potrebno naprezanje brtve (stanje sklapanja)
$Q_{I,min}$	MPa	minimalno potrebno naprezanje brtve (ispitno stanje)
Q_{max}	MPa	maksimalno dozvoljeno naprezanje brtve
r_0	mm	radijus konusnog prstena prirubnice
R_B	mm	polumjer zaobljenja u korijenu navoja vijka
$R_{m,C}$	MPa	statička čvrstoća cijevi
R_{mF}	N/mm ²	vlačna čvrstoća materijala prirubnice
$R_{p0,2}$	N/mm ²	granica razvlačenja materijala prirubnice
S		faktor sigurnosti
t_1	mm	širina nosača osovine
W	mm ³	aksijalni moment otpora osovine
W_C	mm ³	aksijalni moment otpora cijevi
W_F	Nmm	moment otpora prirubnice
X_B	1/mm	aksijalni modul fleksibilnosti vijaka
X_G	1/mm	aksijalni modul fleksibilnosti brtve
Y_{G0}	mm/N	faktor propusnosti sklopa u ispitnom stanju
Y_{GI}	mm/N	faktor propusnosti sklopa u ispitnom stanju
Y_{QI}	mm/N	faktor propusnosti sklopa u ispitnom stanju
Y_{RI}	mm/N	faktor propusnosti sklopa u ispitnom stanju
Z_F	1/mm ³	rotacijski modul fleksibilnosti prirubnice
Z_L	1/mm ³	rotacijski modul fleksibilnosti prirubnice
μ		koeficijent trenja prilikom stezanja vijčanog spoja prirubnice
β		pomoćni faktor
γ		pomoćni faktor
δ_Q		pomoćni faktor za računanje sigurnosti prirubnice
δ_R		pomoćni faktor za računanje sigurnosti prirubnice
ε_{1-}		faktor rasipanja
ε_{1+}		faktor rasipanja
ε_{n+}		faktor raspršivanja sile vijaka (iznad nominalne vrijednosti)
ε_{n+}		faktor raspršivanja sile vijaka (ispod nominalne vrijednosti)
θ	°	kut rotacije
$\theta_{FI,max}$	°	maksimalni kut rotacije prirubnice u ispitnom stanju
$\theta_{FI,min}$	°	minimalni kut rotacije prirubnice u ispitnom stanju
λ		pomoćni faktor

ν		Poissonov koeficijent materijala prirubnice
ν_I		faktor sigurnosti izvijanja
σ_{BM}	MPa	vlačna čvrstoća materijala vijka
σ_{BT}	MPa	granica razvlačenja materijala vijka
σ_{dop}	MPa	dopušteno naprezanje vijka
$\sigma_{dop,C}$	MPa	dopušteno naprezanje cijevi
σ_f	MPa	naprezanje savijanja
σ_{max}	MPa	maksimalno naprezanje vijka
ϕ		sigurnost prirubničkog sklopa
ϕ_{B0}		sigurnost vijka (sklapanje)
ϕ_{BI}		sigurnost vijka (testiranje)
ϕ_{FI}		sigurnost prirubnice (testiranje)
ϕ_{G0}		sigurnost brtve (sklapanje)
ϕ_{GI}		sigurnost brtve (testiranje)
ϕ_{max}		reducirana dozvoljena sigurnost prirubničkog sklopa
χ		omjer geometrijskih parametara prirubnice
ψ_{opt}		omjer opterećenja prirubnice radi radijalne sile (optimalan)
ψ_Z		omjer opterećenja prirubnice radi radijalne sile (očitan)

SAŽETAK

Rad se bavi razradom konstrukcijskog rješenja za ispitivanje prirubničkih spojeva opterećenih vanjskim savojnim momentom. Proveden je proračun prirubničkog spoja za zadani savojni moment prema normi EN 13445-3 / aneks G (alternativna metoda prirubničkih spojeva). U ovom aneksu opisan je izračun prirubničkih spojeva opterećenih vanjskim savojnim momentom i vanjskim aksijalnim silama.

Provedena je analiza postojećih eksperimenata s ciljem proučavanja konstrukcijskih rješenja. Nadalje, generirane su različite moguće izvedbe i modeli uređaja za ispitivanje te je u konačnici odabrano najbolje i najrealnije rješenje za detaljnu razradu.

Razrađeno je konstrukcijsko rješenje prema zadanim vrijednostima savojnog momenta, ali predimenzionirano radi mogućeg ispitivanja više različitih prirubničkih spojeva. Bitna stavka razrade uređaja je bila jednostavnost i ekonomska prihvatljivost uređaja, radi mogućeg izrade uređaja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu te mogućeg ispitivanja i analize prirubničkih spojeva opterećenih savojnim momentom u budućnosti.

1 UVOD

Prirubnički spojevi su osnovni dijelovi gotovo svakog tlačnog sustava, ali isto tako spadaju i u najkompleksnije dijelove takvih sustava zbog raznih faktora i problema do kojih može doći prilikom njihovog rada ili čak prilikom instalacije takvih spojeva. Prisutni su gotovo u svakom industrijskom postrojenju, plinovodu, pa čak i u svakom kućanstvu. U današnje vrijeme, novac i ekološka svijest igraju jako veliku ulogu, pa samim time pouzdanost i sigurnost prirubničkih spojeva dobiva sve veću važnost. U tablici 1. možemo vidjeti da prirubnički spojevi spadaju među 3 najčešća uzroka propuštanja medija na platformama te samim time dobivaju sve veću pozornost prilikom pronalaženja i uklanjanja njihovih problema.

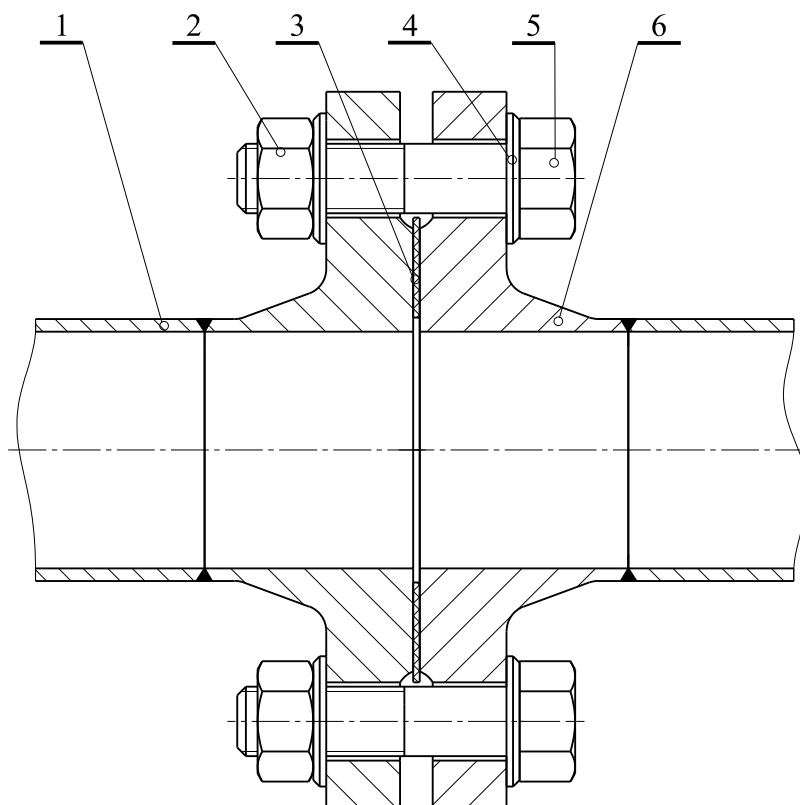
Tablica 1. Najčešći uzroci propuštanja medija na odobalnim (*offshore*) platformama [1]

Cijevi	21%
Radni instrumenti	18%
Prirubnice	10%

Ovaj rad temelji se na izradi naprave za ispitivanje prirubničkog spoja pod utjecajem vanjskog savojnog momenta, koji spada u jedan od problema prirubničkih spojeva zbog kojeg dolazi do propuštanja i gubitka pouzdanosti spoja. Potrebno je definirati sam prirubnički spoj, navesti glavne probleme koji dovode do gubitka pouzdanosti prirubničkih spojeva te u konačnici koncipirati napravu za ispitivanje zadanog prirubničkog spoja. U zadatku je zadan jedan tip grla prirubnice (DN50 PN40), te samim time definirana veličina cijevi prirubničkog spoja, međutim za cilj koncepta uzet će se i mogućnost primjene naprave za ispitivanje više različitih dimenzija prirubničkih spojeva.

2 Prirubnički spojevi

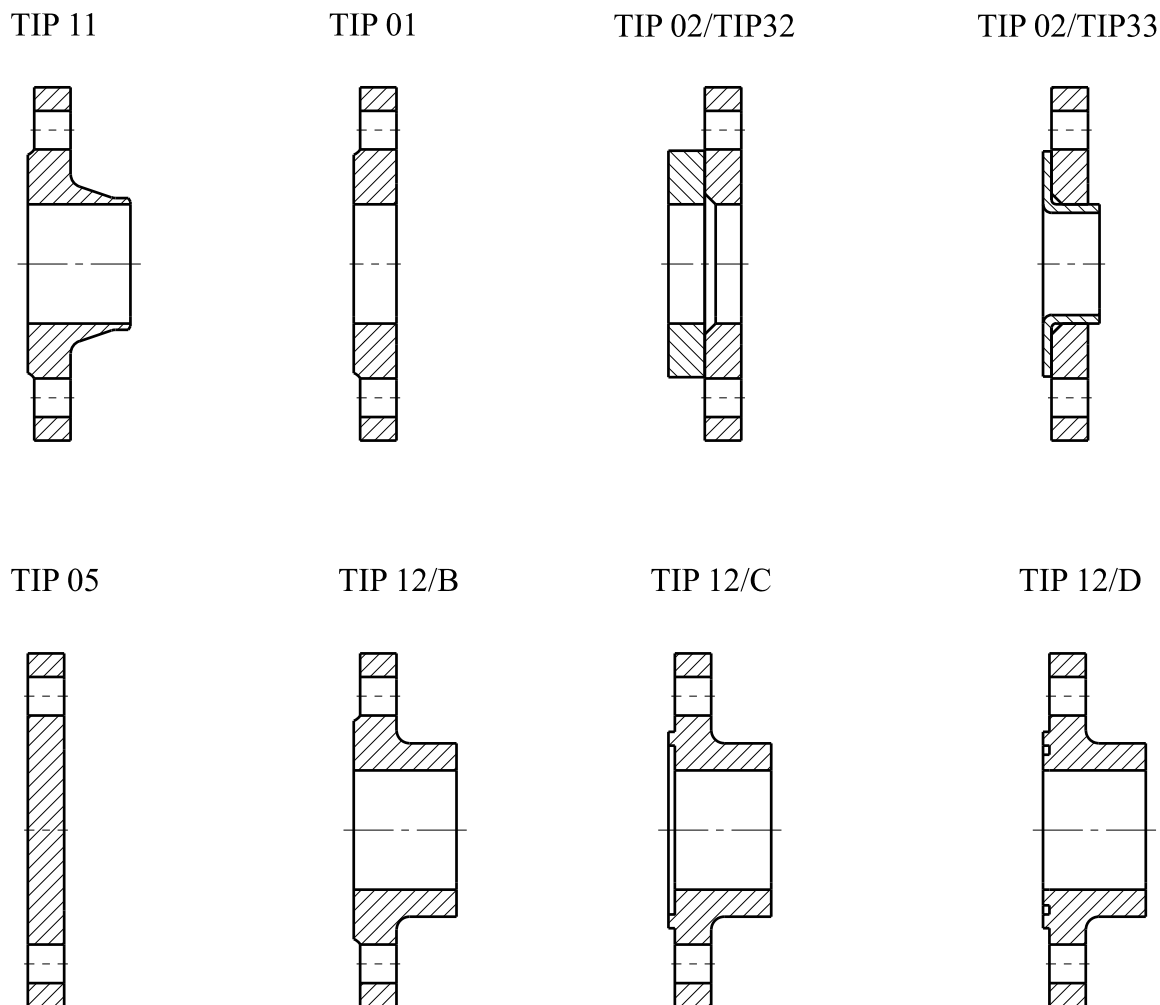
Zadatak velikog broja procesno-energetskih sustava je prijenos medija s jednog mjesta na drugo na siguran i pouzdan način. Cijevi takvih sustava ne mogu ići u beskonačnost te vrlo često mijenjaju svoj smjer i dimenzije. Dvije glavne grupe spajanja navedenih sustava su spajanje zavarivanjem i spajanje prirubničkim spojevima te kao i svaki drugi sustav imaju svoje prednosti i mane. Prirubnički spoj je kompleksna kombinacija koja uključuje brojne faktore i čimbenike (prirubnica, vijci, proces, temperatura, tlak, medij). Svaki od njih utječe na pouzdanost i sigurnost spoja, a njihova se međusobna povezanost mijenja te utječe na konačni rezultat spoja. Glavni i osnovni zadatak prirubničkih spojeva je spojiti dvije neovisne strane (cijevi, posude pod tlakom, ventili...). Slika 1. prikazuje presjek prirubničkog spoja i dijelove od kojih se sastoji. Također, treba naglasiti da prikazani prirubnički spoj nije jedini, već samo primjer prirubničkog spoja te se izgled i dizajn svakog spoja razlikuje od primjene do primjene, normama, te je rezultat navedenih faktora.



Slika 1. Prirubnički spoj

(1 – cijev, 2 – matica, 3 – brtva, 4 – podložna pločica, 5 – vijak i 6 – prirubnica)

Industrija je prepoznala veliku važnost u instalaciji, sklapanju i konstruiranju ovakvih spojeva te je kao rezultat objavljeno niz normi i regulativa kojima se regulira kvaliteta i sigurnost ovakvih spojeva, koje uključuju područja od konstruiranja prirubnica, brtvenih materijala, dozvoljenih postotaka ispuštanja medija, pa sve do kvalificiranih radnika prilikom instalacije. Slika 2. prikazuje izvadak norme EN 1092-1 s osnovnim tipovima prirubnica.



Slika 2. Tipovi prirubnica i naliježućih površina prirubnica (izvadak) prema EN 1092-1:2008-09 [2]

2.1 Problemi prirubničkih spojeva

John H. Bickford u svojoj knjizi: „Osnove u konstruiranju i ponašanju vijčanih spojeva“, je napisao:

„Ta, sve važna sila stezanja koja drži spoj spojenim, i bez koje ne bi bilo spoja, nije ostvarena radi dobrog konstruktora spoja, niti radi visokokvalitetnih dijelova. Ostvarena je od strane mehaničara na radnom mjestu instalacije, koristeći alate, procedure i radne uvjete

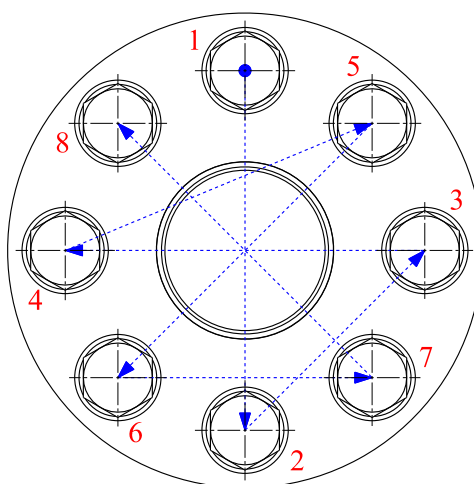
koje smo im mi omogućili... Konačni, esencijalni „tvorac“ sile je mehaničar, a vrijeme stvaranja sile je prilikom sklapanja, te je vrlo bitno za nas shvatiti ovaj proces.“ [3]

Citatom profesora Blickford-a možemo zaključiti da krajnja osoba koja obavlja instalaciju prirubničkog sklopa je od vrlo velike važnosti, te danas kao jedan od glavnih uzroka propuštanja prirubničkih sklopova i dalje čini ljuski faktor. Naravno ljudski faktor kao uzrok propuštanja sklopova je prepoznat unutar industrije, te je u Europi donesen standard „TS EN 1591 – Dio 4: Prirubnice i njihovi spojevi“ koji pokriva pravila, potrebnu obuku i kvalificiranost radnika koji mogu obavljati poslove instalacija prirubničkih spojeva. Dobar prirubnički spoj, kao što je spomenuto ovisi o brojnim međusobno ovisnim faktorima i dovoljno je samo da jedan od tih faktora zakaže i cijeli spoj počinje popuštati.

2.1.1 Najčešći uzroci propuštanja prirubničkih spojeva mogu biti:

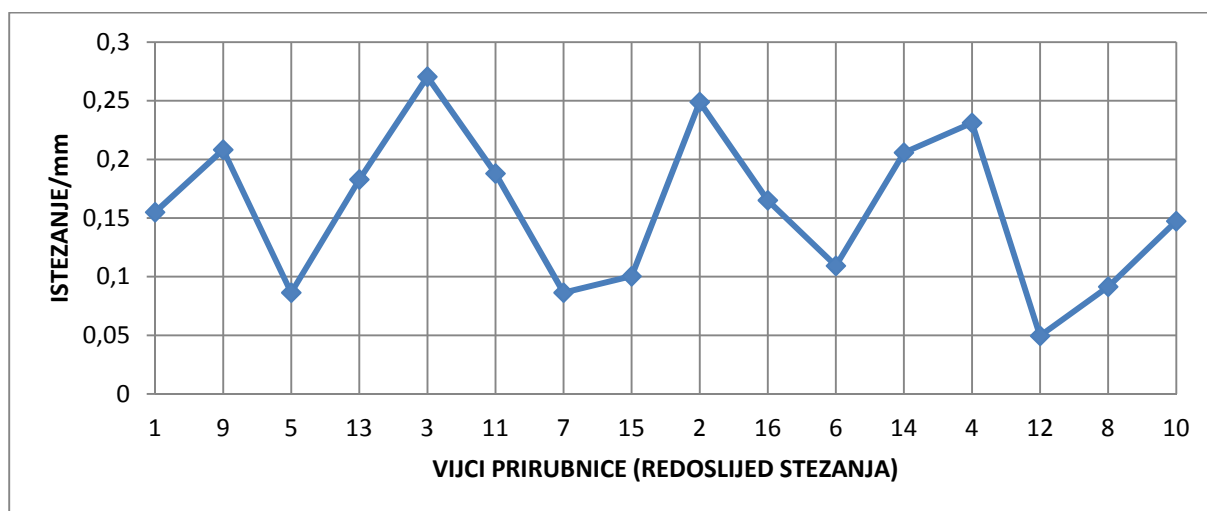
2.1.1.1 Nejednaka sila na vijcima

Svaki prirubnički sklop mora biti stegnut ovisno o broju vijaka, metodi stezanja (ručno, momentnim ključem, hidrauličkim uređajem za stezanje) prema posebnim pravilima i procedurama. Kao rezultat lošeg pritezanja može se dogoditi da određeni vijci nisu dovoljno pritegnuti, dok su ostali previše pritegnuti (dolazi do gnječenja brtve). Kao rezultat ovog problema javlja se propuštanje prirubničkog spoja prilikom rada, posebice prilikom rada s medijima na visokim temperaturama i tlakovima, dolazi do rasterećenja vijčanog spoja i propuštanja medija. Na slici 3. možemo vidjeti primjer križnog redoslijeda pritezanja prirubnice sa 8 vijaka.



Slika 3. Križni redoslijed pritezanja prirubnice sa 8 vijaka

Slika 4. prikazuje primjer ručnog pritezanja prirubničkog spoja sa 16 vijaka, momentnim ključem sa metodom prikazanom na slici 3. i momentom od 271,16 Nm, te izmjere istezanja vijaka nakon stezanja. Vidljivo je da su vrijednosti istezanja i samim time naprezanja i sile raspršene i prelaze granicu od $\pm 30\%$, što je prilično nepoželjno i neprecizno. Veliki i zahtjevni spojevi se uglavnom stežu hidrauličkim uređajima kojim se ovakvo raspršivanje smanjuje i veći broj vijaka se zateže odjednom, za razliku od ručnih metoda gdje se zateže vijak po vijak.



Slika 4. Dijagram istezanja pojedinačnih vijaka prilikom pritezanja prirubničkog spoja momentnim ključem [3]

2.1.1.2 Nepravilna pozicija prirubnica

Površine dodirnih prirubnica bi trebale biti paralelne, u slučaju ne paralelnosti dolazi do unosa vanjskog savojnog momenta u sustav što može dovesti do nejednakog rasporeda pritiska na brtvenom elementu, lokalnog gnječenja, te u konačnici propuštanja medija. Drugi uzrok ove kategorije čini koncentričnost prirubnica, tj. prirubnice moraju biti pozicionirane koncentrično jer također može doći do nepravilno raspoređenog kompresije brtvenog elementa i u konačnici propuštanja spoja.

2.1.1.3 Nepravilna pozicija brtvenog elementa

Ako brtveni element nije pozicioniran koncentrično ovisno o poziciji prirubnica, brtveni element neće biti jednoliko pritisnut, što može dovesti do propuštanja spoja (neki

brtveni elementi uobičajeno imaju centrirajući prsten kojim centriraju brtveni element, također, neke prirubnice su konstrukcijski riješene tako da imaju utor za brtveni prsten te se na taj način mogućnost neprecizne pozicije brtvenih elemenata smanjuje).

2.1.1.4 Prljave ili oštećene površine prirubnica

Prašina, prljavština, ogrebotine, ostaci zavarivanja na površinama nalijeganja prirubnica mogu dovesti do stvaranja putova za istjecanje medija, te također mogu dovesti do nejednolikog rasporeda kompresije na brtvenom elementu.

2.1.1.5 Prekomjerna opterećenja u cijevnom sustavu na mjestu prirubnica

Prekomjerni unos vanjskih dodatnih sila i momenata mogu dovesti do rasterećenja vijčanog spoja i deformacija prirubnica, što može dovesti do propuštanja spoja. Glavni uzroci mogu biti neadekvatna fleksibilnost cijevnog sustava, nepravilna pozicija potpornih elemenata cijevnog sustava.

2.1.1.6 Termalni šok

Velike temperaturne promjene mogu dovesti do trenutne deformacije prirubnica. Ovakvi slučajevi su češći u sustavima koji rade na visokim temperaturama. Do problema može dovesti i temperaturna promjena oko površine prirubnice, tj. ako sustav radi pri visokim temperaturama, dok se vanjska površina prirubničkog spoja hladi radi vanjskih utjecaja (kiša, hladni medij na dnu – vrući pri vrhu). Rješavanje ovakvih problema uobičajeno se provodi instalacijom metalnih štitova, koji štite spoj od vanjskih utjecaja, i održavaju jednoliku temperaturu na cijelom prirubničkom spoju.

2.1.1.7 Nepravilna specifikacija i veličina brtvenog elementa

Nepravilnim odabirom materijala, kao i neodgovarajućim dimenzijama brtvenog elementa može doći do propuštanja spoja prilikom pokretanja sustava.

2.1.1.8 Vibracije

Također jedan od uzroka propuštanja prirubničkih spojeva, polako dolazi do relaksacije vijčanog spoja, koja sa vremenom postaje sve veća što u konačnici dovodi do propuštanja cijelog prirubničkog spoja.

Zaključno, možemo reći da su prirubnički spojevi vrlo važan dio industrije, ali isto tako, s velikim brojem takvih spojeva dolazi i veliki broj problema i faktora o kojima treba voditi računa, bilo prilikom konstruiranja, bilo prilikom same montaže prirubničkih spojeva. Može se vidjeti da postoji veliki broj uzroka radi kojih može doći do propuštanja prirubničkih spojeva. Savojni moment igra jako veliku ulogu unutar prirubničkih spojeva, posebice u velikim plinovodima, te ga je ponekad nemoguće izbjeći. Unos vanjskog savojnog momenta u sustav može nastati zbog dva uzroka: radi nepravilne pozicije prirubnica i radi prekomjernih opterećenja u cijevnom sustavu. Vrlo je bitno ispitati kritični savojni moment prilikom kojeg dolazi do propuštanja prirubničkog spoja.

3 ANALIZA POSTOJEĆIH RJEŠENJA I EKSPERIMENTA

Da bi ostvario zadovoljavajuće i pouzdane performanse svaki prirubnički spoj mora zadovoljavati dva stanja opterećenja. Prvo stanje sastoji se od samog sastavljanja spoja i pritezanja vijaka. Prije puštanja medija kroz sustav sila pritezanja sklopa treba biti u najgorem slučaju jednaka minimalnoj sili potrebnoj za održanje brtvljenja u radnom stanju. Također je potrebno obratiti pozornost na maksimalno dozvoljenu silu prilikom koje dolazi do gnječenja brtvenog elementa te samim time pada performansi brtvenog elementa. Drugo stanje sastoji se od unosa tlačnog medija koji opterećuje cijeli sustav. Dodatno u sam sustav potrebno je unijeti i vanjski savojni moment te provesti ispitivanje prirubničkog spoja.

Rašireni problemi prirubničkih spojeva su također u velikom broju istraživani i testirani unutar akademske zajednice. Rezultat takvih istraživanja su brojni eksperimenti te studije vezane za probleme prirubnica i njihovih spojeva.

Prije početka koncipiranja uređaja za ispitivanje, potrebno je pogledati i analizirati slične i postojeće eksperimente vezane uz ispitivanje prirubničkih spojeva opterećenih vanjskim savojnim momentom, iznijeti zaključke i u konačnici njihove prednosti i mane.

3.1 Kombinirani utjecaj vanjskog opterećenja na standardne i kompaktne prirubnice [4]

Eksperiment su napravili profesori Nash i Abid sa zavoda za strojarstvo, sveučilišta Strathclyde u Glasgow-u, Škotska.

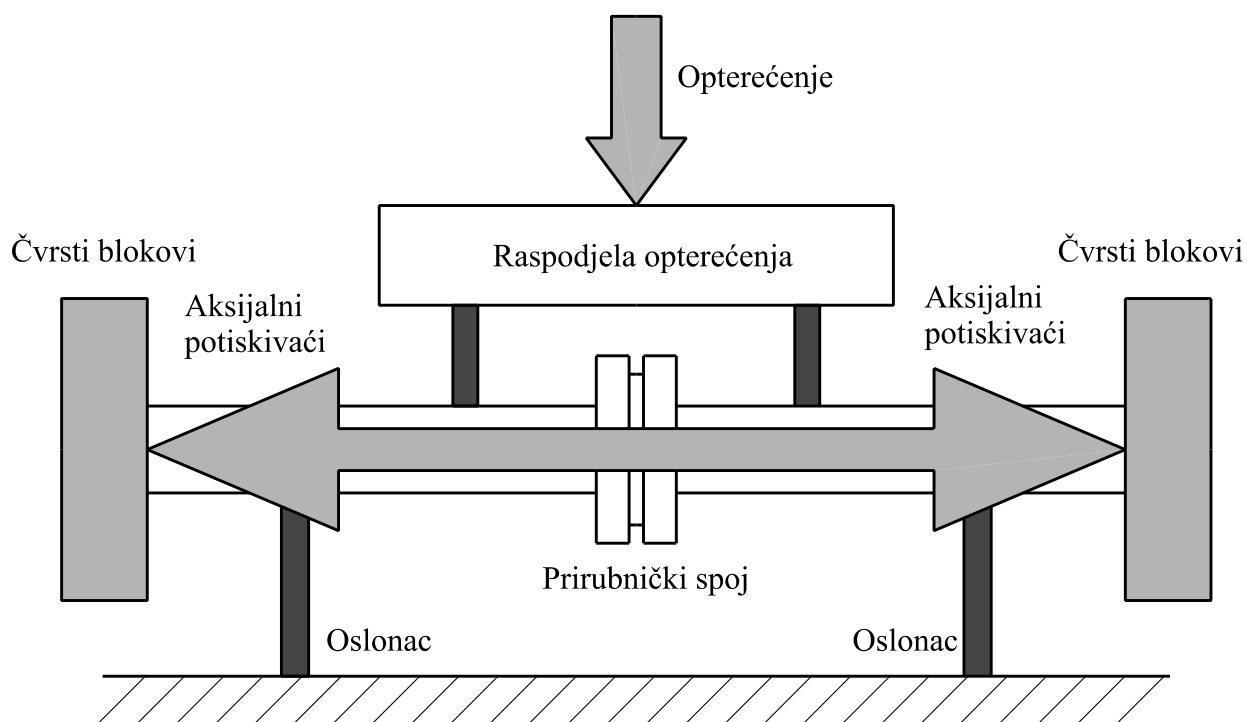
Cilj ovog eksperimenta je ispitati utjecaj na usporedne prirubničke spojeve, prilikom vanjskog opterećenja prirubnica (vanjska sila i vanjski savojni moment). U svrhu ispitivanja razvijen je i uređaj za vršenje ispitivanja. Ispitivane su prirubnice ANSI¹ standarda, grla 102mm, klase 900# sa spiralno pletenom brtvom i uspoređene sa VCF² kompaktnim prirubničkim spojem sličnih specifikacija, sa i bez brtvenog elementa (O-prsten).

¹ ANSI (American National Standards Institute) je neprofitna organizacija nadležna za razvoj standarda za proizvode, servise, procese i sustave u SAD-u.

² Tip posebno razvijane izvan standardne kompaktne prirubnice Norveške tvrtke VERAX.

ANSI prirubnički spoj sastoji se od 8 vijaka, M30, za razliku od usporednog VCF kompaktnog sustava za koji je potrebno 16 vijaka, M10, stoga usporedba je vršena upotrebom metode „linearne interakcije“ i zatim uspoređena sa ekvivalentnim tlačnim modelom.

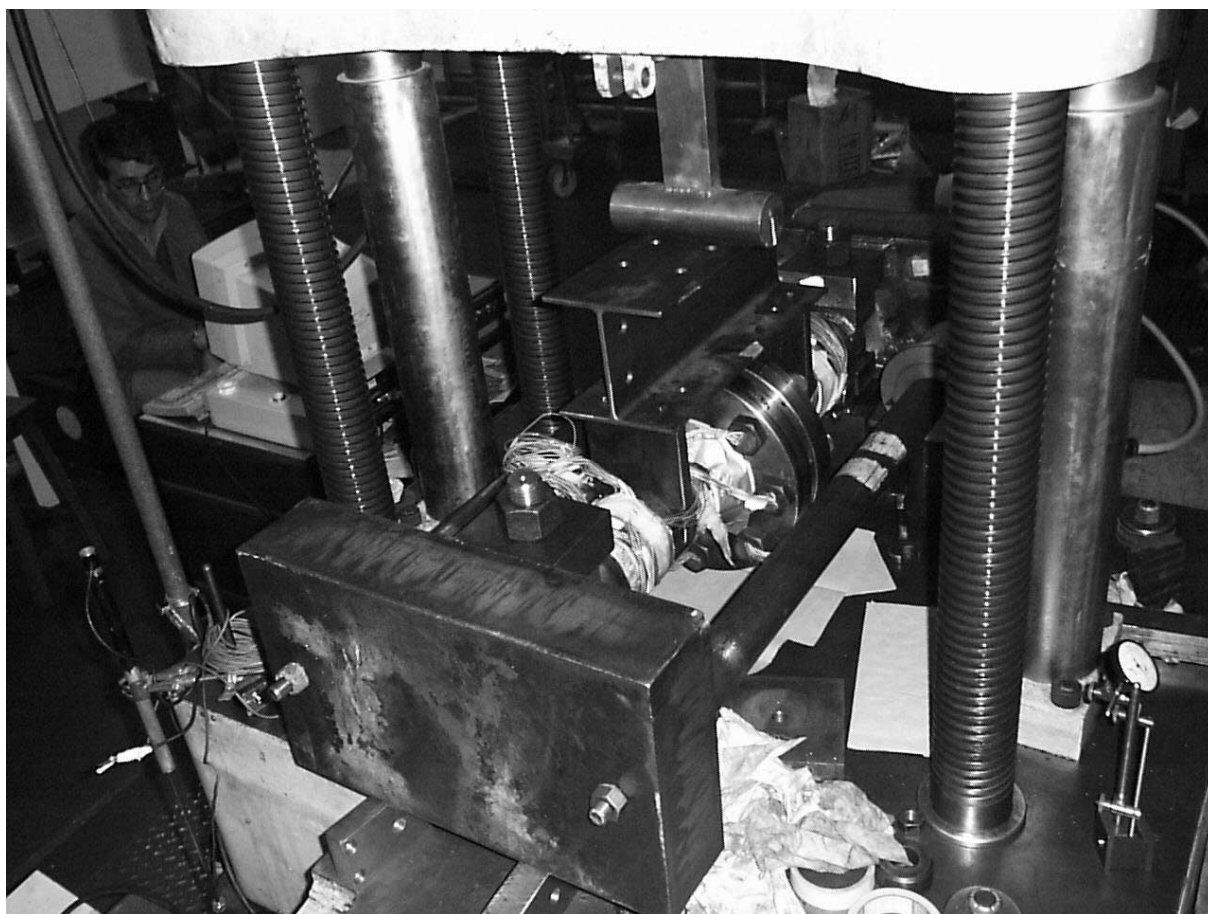
Uređaj za ispitivanje je konstruiran tako da se može koristiti kao dio uređaja za vlačno-tlačno ispitivanje tvrtke Instron [5] koji su imali na raspolaganju. Opterećenje se vrši kombinacijom različitih sustava koji se sadrže od pumpe, okvira za tlačenje i vijčanog sustava za ispitivanje. Osnovni princip rada stroja možemo vidjeti na slici 5. Unos tlačnog medija ostvaruje se pomoću ručno upravljane pumpe kapaciteta 500 bara, te mjerenja unutarnjeg tlaka na samoj pumpi, kao i na posebnom uređaju za mjerenje tlaka montiranom na prirubnički spoj. Vanjsko aksijalno opterećenje unosi se pomoću dva simetrična i paralelna potiskivača pogonjena hidrauličkim cilindrima.



Slika 5. Osnovni princip rada uređaja za ispitivanje [4]

Savojni moment ostvaren je upotrebom glave ispitnog stroja Instron na koju je posebno montirana konstrukcija za širenje opterećenja na željene pozicije prirubničkog spoja. Reakcijske sile preuzimaju dva slobodna oslonca, omogućujući cijelom prirubničkom spoju rotaciju oko horizontalne osi.

Izabrano nominalno pred-opterećenje vijčanog spoja je 50% vlačne čvrstoće ANSI vijčanog spoja (361 N/mm^2). Ovakvo opterećenje spada u maksimalno dopušteno opterećenje vijaka najčešće upotrebljavano u naftnoj industriji. ANSI standard ne propisuje magnitudu pred-opterećenja vijaka, već samo minimalno potrebno opterećenje za ostvarivanje brtvljenja, ovisno o brtvenom elementu, stoga se koristi iskustvena vrijednost pred opterećenja. Svaki vijak je pritegnut u četiri faze te je u svakoj fazi povećan parametar momenta dok nije ostvaren željeni moment stezanja prirubničkog spoja (210 Nm, 310 Nm, 400 Nm i 505 Nm). Također, vijci su bili podmazani mazivom korištenim prilikom pritezanja ovakvih spojeva u industriji. Za vijke ovakve veličine preporučeno je pritezanje hidrauličkim uređajem, ali za ovaj eksperiment, taj uređaj nije bio dostupan, već je pritezanje ostvareno momentnim ključem mjernog područja 200-810 Nm, što se prema njihovim iskustvima pokazalo vrlo teško, te su u finalnoj fazi stezanja vijaka bile potrebne najmanje dvije osobe.



Slika 6. ANSI prirubnički spoj opterećen unutarnjim tlakom, savojnim momentom i aksijalnom silom [4]

Cijeli uređaj učvršćen je na pod da bi se izbjeglo bilo kakvo pomicanje i u konačnici utjecaj na izlazne rezultate ispitivanja.

Da bi što jasnije razumjeli rezultate i opterećenja prirubničkog spoja, procedura opterećenja spoja se sastojala od više faza, nakon koje se očitaju izlazni rezultati. Također faze su se sastojale od: kontaktne faze (nema opterećenja), faze sklapanja prirubničkog spoja i konačne faze nakon opterećenja unutarnjim tlakom, savojnim momentom i/ili aksijalnom silom. Ovakav pristup omogućuje jasnije i bolje interpretiranje izlaznih rezultata, za razliku od samo jedne konačne faze prilikom koje smo ograničeni na samo jedan izlazni rezultat.

3.1.1 Zaključak i rezultati eksperimenta

Eksperiment se poglavito bavio uspoređivanjem dviju različitih normiranih prirubnica, stoga njihovi zaključci i rezultati su usko vezani uz te prirubnice.

Prilikom opterećenja samo unutarnjim tlakom, naprezanja ANSI prirubničkog spoja se pokazao 10 puta većim od usporednog VCF spoja. Na tlakovima iznad normiranih tlakova, naprezanja unutar oba spoja rastu, ali konačno naprezanje VCF spoja je uvijek bilo manje od ANSI prirubničkog spoja.

Za vrijeme najkritičnije faze ispitivanja (unutarnji tlak, savojni moment i aksijalna sila), zabilježeni rezultati prilikom ispitivanja (ANSI – moment: 8,71 kNm, sila: 121 kN; VCF – moment: 5,85 kNm, sila: 172,5 kN) pokazali su da su maksimalni iznosi naprezanja obje prirubnice bile unutar dopuštenih naprezanja materijala. Također naprezanja vijaka su isto bila u granicama dopuštenih. U ovoj fazi, također je zabilježeno veće naprezanje unutar ANSI prirubničkog spoja za razliku od VCF spoja, te nije došlo do propuštanja prirubničkih spojeva.

U konačnici zaključeno je da ANSI normirana metoda proračuna daje prilično konzervativne rezultate, te da je moguće opteretiti spoj s velikim iznosom savojnog momenta, a da on ne izgubi pouzdanost i sigurnost.

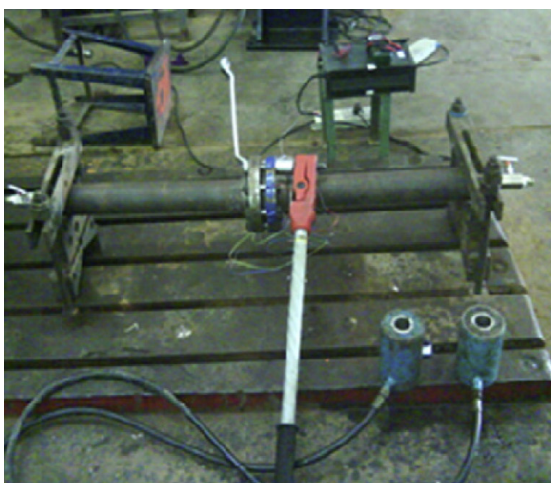
3.2 Studija prirubničkih spojeva opterećenih savojnim momentom s anisotropnim „Hill“ modelom za brtveni element [7]

Studiju su napravili profesori Mathan i Prasad sa zavoda za strojarstvo, Madraškog instituta za tehnologiju u Indiji. Cilj studije je ispitati prirubničke spojeve opterećene savojnim momentom i usporediti eksperiment s analizom konačnim elementima, prema anisotropskom „Hill“ plastičnom modelu za brtveni element.

U svrhu ispitivanja razvili su napravu za ispitivanje prirubničkog spoja za ANSI prirubnicu klase 600, dimenzije grla 80 mm sa 8 vijaka, M20.

Naprava se sastoji od dva kratka oslonca na kojemu leži prirubnički spoj. Spoj se zateže ručno momentnim ključem u 5 faza do konačnog momenta od 250 Nm. Unos tlačnog opterećenja u sustav ostvaruje se tlačnom pumpom, dok se unos momenta ostvaruje s dva hidraulična cilindra. Cilindri se nalaze na kraku od 300 mm i unose silu od 10000 N, stvarajući tako moment od 3 kNm.

Prirubnica je normirana na maksimalni radni tlak od 68,25 bara pri sobnoj temperaturi, s normiranim tlakom ispitivanja od 102 bara. Ispitivanje je vršeno na tlaku manjem od normiranog (30 bara) koji se unosio u koracima od 5 bara uz očitavanje vrijednosti elektrootporničkih tenzometara na svakom koraku ispitivanja. Savojni moment se također unosio u 5 faza sve do konačne vrijednosti od 3 kNm.



a)



b)

Slika 7. Ispitna naprava [7]

(a) montaža prirubničkog spoja i b) ispitivanje prirubničkog spoja)

3.2.1 Zaključak i rezultati eksperimenta

Svrha opisane studije bila je ispitati prirubnički spoj primjenom metode konačnih elemenata, uzimajući u obzir nelinearna svojstva brtvenog elementa i vrijednosti validificirati preko eksperimenta. Dobivene vrijednosti preko MKE metode su unutar granica ANSI tlačnog modela te ispitivači zaključuju da bi anisotropski „Hill“ model mogao biti alternativni model proračuna sa zadovoljavajućom preciznošću.

3.3 Zaključak analize

Pomoću analize postojećih eksperimenata definirani su sljedeći zahtjevi:

- zatezanje prirubničkog spoja
- način i konstrukcijsko rješenje unosa savojnog statičkog momenta
- način unosa tlačnog opterećenja
- mjerenje sile vijaka prirubničkog spoja
- mjerenje pomaka prirubnice
- mjerenje tlačnog medija

Zadana je prirubnica grla DN50 PN40, ali pažljivom analizom postojećih eksperimenata dolazimo do zaključka da uređaj za ispitivanje treba biti u stanju ispitati više različitih vrsta normiranih prirubničkih spojeva, vodeći se zadanom prirubnicom kao glavnom varijantom uređaja.

Zatezanje cijelog sklopa je potrebno ostvariti u fazama do konačnog momenta zatezanja, da bi se ostvarila što jednoličnija sila pritezanja sa što manjim rasipanjem sile.

Nadalje, unos savojnog momenta i tlačnog opterećenja također se treba vršiti u više faza i očitavati rezultate ispitivanja u svakoj fazi eksperimenta, radi što više podataka za naknadnu analizu i možebitno smanjenje vanjskih utjecaja na eksperiment.

Konstrukcijsko rješenje treba biti ekonomski isplativo jer postoji mogućnosti izrade i upotrebe uređaja za ispitivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

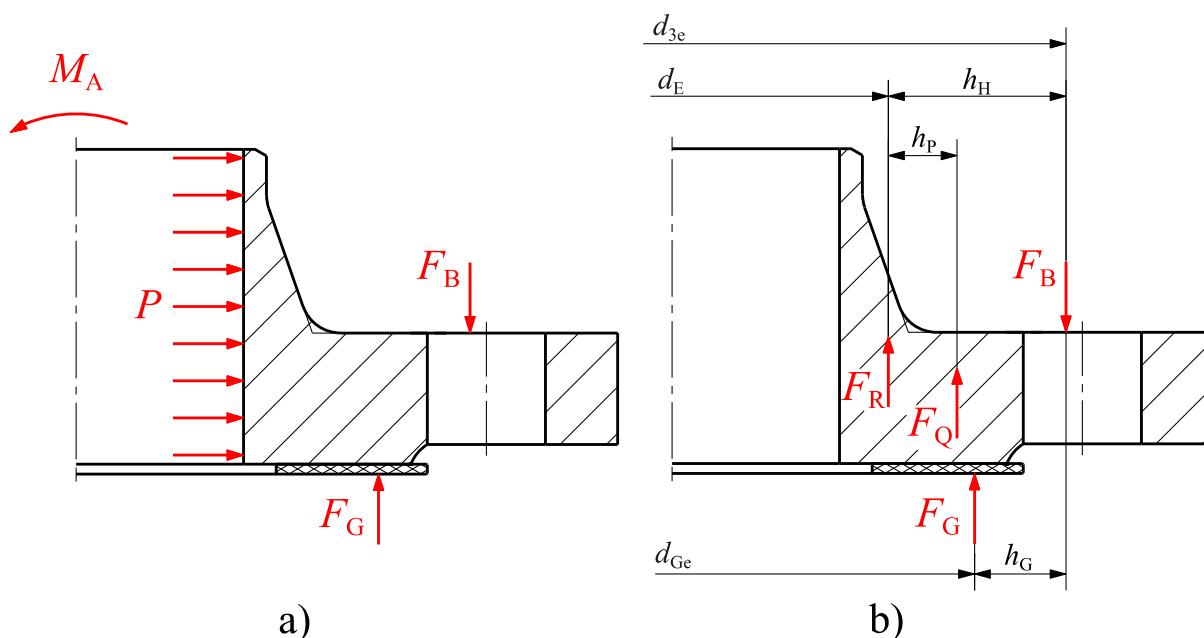
4 PRORAČUN

Proračun prirubničkog spoja će se provesti prema normi EN 13445-3/aneks G [11] (alternativna metoda prirubničkih spojeva), koja daje normirani izračun prirubničkih spojeva opterećenih vanjskim savojnim momentom.

Proračun se može koristiti za sljedeće vrste opterećenja:

- tlak medija: unutarnji i vanjski;
- vanjska opterećenja: aksijalne sile i savojni momenti;
- aksijalna termalna ekspanzija prirubnica, vijaka i brtve

Opterećenje prirubničkog spoja je asimetrično, te se vanjski savojni momenti tretiraju kao ekvivalentne aksijalne sile prema jednadžbi (78). Minimalna potrebna sila prilikom sklapanja računa se prema jednadžbi (92) te osigurava potrebne reaktivne sile brtve dovoljne za osiguranje brtvljenja unutar svih faza rada. Na slici 8. prikazana su početna opterećenja za zadanu vrstu prirubnice (slika 8. - a), te ekvivalentne sile (prema jednadžbama (77), (78), (155) i (157)) i krakovi djelovanja sila (prema jednadžbama (87), (72) i (73)) (slika 8. - b).

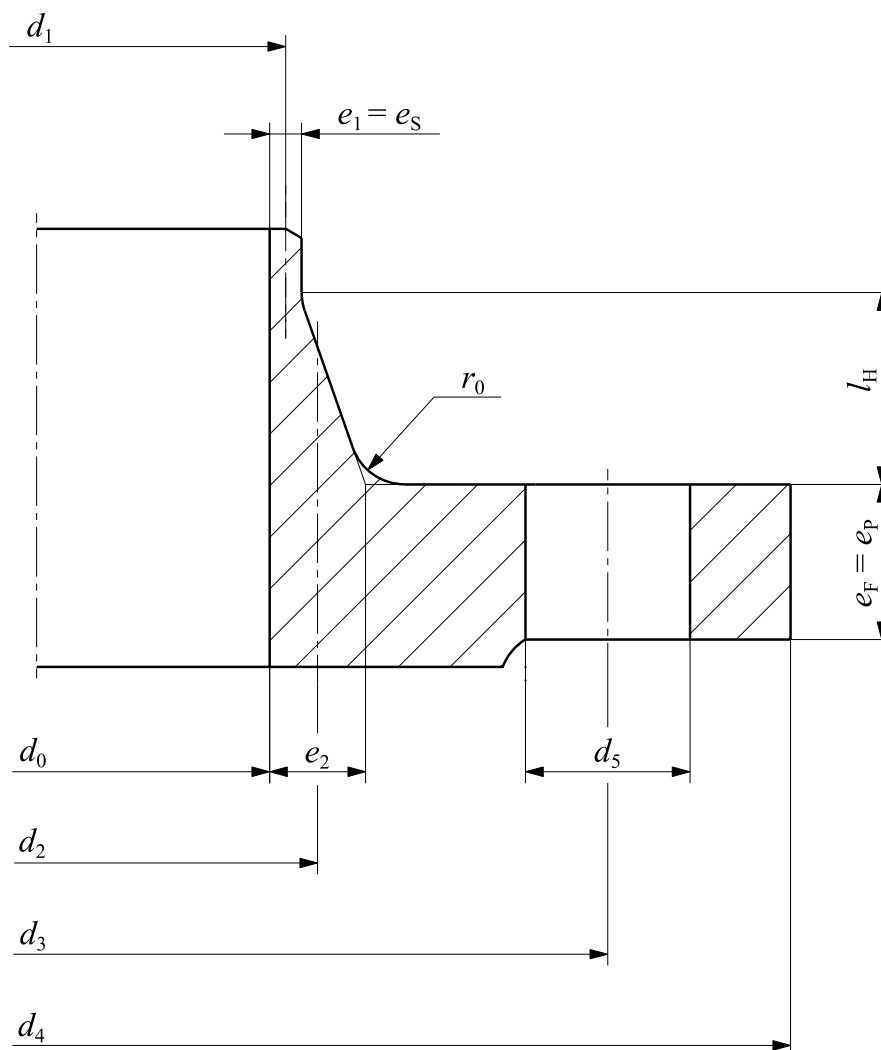


Slika 8. Opterećenja prirubnice
(a) opterećenja i b) ekvivalentna opterećenja)

4.1 Ulazni podaci

4.1.1 Prirubnica

Proračun prirubničkog spoja će se provesti za zadanu prirubnicu DN50 PN40 tipa 11 prema normi EN 1092-1 [2] (slika 9.). U tablici 2. dane su dimenzije prirubnice DN50 PN40. Tablica 3. prikazuje vrijednosti vezane uz zadani materijal X2CrNi19-11.



Slika 9. Oznake na prirubnici prema [11]

Tablica 2. Dimenzije zadane prirubnice DN50 PN40 [2]

d_0	d_3	d_4	d_5	e_1	e_2	e_F	l_H	r_0	e_P	n_B	N_R
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		
54,5	125	165	18	2,9	10,25	17	20	6	17	4	5

Tablica 3. Specifikacije materijala X2CrNi19-11

E_{F0}	E_{FI}	R_{mF}	$R_{p0,2}$	ν
GPa	GPa	N/mm ²	N/mm ²	
210	210	460	180	0,28

Geometrijske veličine srednjeg promjera tanjeg dijela prstena prirubnice d_1 i srednjeg promjera konusnog prstena prirubnice d_2 računaju se prema izrazima

$$d_1 = d_0 + \frac{e_1}{2} = 55,95 \text{ mm} , \quad (1)$$

$$d_2 = d_0 + \frac{e_2}{2} = 59,625 \text{ mm} . \quad (2)$$

Dopušteno naprezanje računa se kao minimalna vrijednost vlačne čvrstoće i granice razvlačenja materijala prirubnice dane izrazom

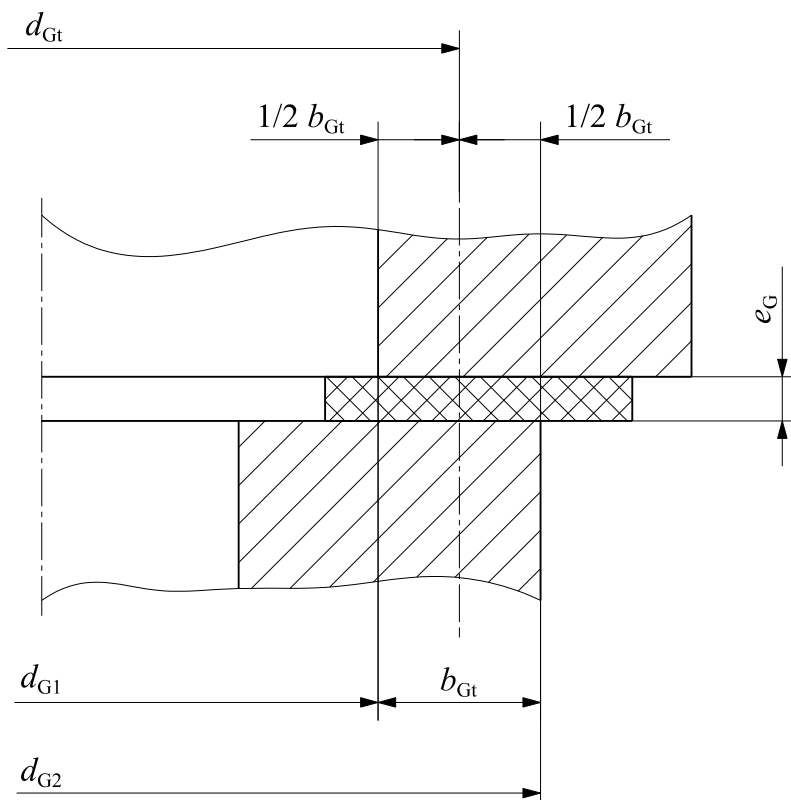
$$f_F = \min \left\{ \frac{R_{p0,2}}{1,5} , \frac{R_{mF}}{2,5} \right\} = 120 \text{ MPa} . \quad (3)$$

Dopušteno naprezanje stijenke prirubnice dana je izrazom

$$f_s = \frac{R_{p0,2}}{1,05} = 171,429 \text{ MPa} . \quad (4)$$

4.1.2 Brtva

Slika 10. prikazuje karakteristične oznake brtve koje se koriste u proračunu prema [11]. U tablici 4. dane su dimenzije brtve kao i specifikacije zadanog materijala brtve - PTFE (poli-tetra-flour-etilen) .



Slika 10. Oznake na brtvi prema [11]

Tablica 4. Dimenzije i specifikacije materijala brtve (PTFE) prema [11]

d_{G1}	d_{G2}	e_G	$Q_{0,min}$	Q_{max}	E_0	K_1	m_t	g_c
mm	mm	mm	MPa	MPa	MPa			
61	102	2	10	50	600	20	1,3	0,9

4.1.3 Sile, momenti, tlak

Zadani nazivni tlak prirubničkog spoja iznosi 40 bar, te se ispitivanje provodi do zadane vrijednosti vanjskog savojnog momenta (M_{AI}) od 1000 N. Dodatnih aksijalnih sila prilikom sklapanja (F_{A0}) kao i aksijalnih sila prilikom ispitivanja (F_{AI}) nema. Također,

prilikom sklapanja ne postoji niti vanjski savojni moment (M_{A0}). U tablici 5. možemo vidjeti zadane vrijednosti opterećenja za prirubnički spoj.

Tablica 5. Zadane vrijednosti opterećenja prirubničkog spoja

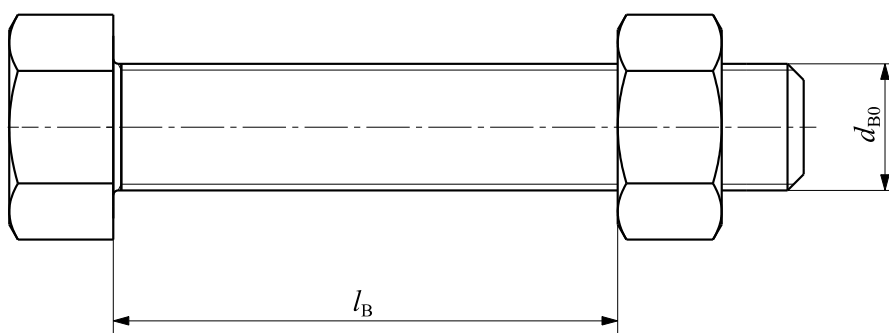
F_{A0}	M_{A0}	F_{AI}	M_{AI}	P
N	Nm	N	Nm	bar
0	0	0	1000	40

Ispitivanje prirubničkog spoja izvodi se na tlaku većem od definiranog nazivnog tlaka, prema [11] tlak testiranja treba biti maksimalno 1,5 puta veći od nazivnog tlaka kao što je dano izrazom

$$P_1 = 1,5 \cdot P = 60 \text{ bar} . \quad (5)$$

4.1.4 Vijci na prirubnici

Zadani prirubnički spoj sastoji se od 4 vijka, M16. Na slici 11. dane su karakteristične oznake na vijcima potrebne za proračun. U tablici 6. možemo vidjeti vrijednosti odabranih vijaka M16 kvalitete 10.9.



Slika 11. Oznake na vijcima karakteristične za proračun prema [11]

Tablica 6. Vrijednosti odabranih vijaka

d_{B0}	p_t	d_{B2}	d_{B3}	R_B	A_{Bk}	σ_{BM}	σ_{BT}	l_B	E_{BI}	μ
mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	MPa	MPa	mm	GPa	
16	2	14,701	13,546	0,289	144	1000	900	47,5	210	0,15

Srednji efektivni promjer vijka, d_{Be} iznosi

$$d_{Be} = \frac{(d_{B2} + d_{B3})}{2} = 14,124 \text{ mm} . \quad (6)$$

Dopušteno naprezanje vijka prilikom sklapanja, f_{B0} dano je izrazom

$$f_{B0} = \frac{\sigma_{BM}}{4} = 200 \text{ MPa} . \quad (7)$$

Ispitivanje prirubničkog spoja u zadanom slučaju se provodi pri istoj temperaturi kao i sklapanje spoja, stoga dopušteno naprezanje vijka za ispitno stanje ostaje ne promijenjeno te je dano izrazom

$$f_{BI} = f_{B0} = 200 \text{ MPa} . \quad (8)$$

4.2 Efektivna širina brtve

Efektivna širina brtve za većinu brtvi ovisi o sili F_G kojom se brtva opterećuje. Računanje efektivne širine brtve provodi se iterativno kroz tri glavna koraka :

1. pretpostaviti inicijalnu vrijednost sile F_{G0} (za početnu vrijednost uzimamo minimalnu silu potrebnu za efektivno brtvljenje) jednadžba (9),
2. prema jednadžbi (28) provodi se iteracija kojom dobivamo efektivnu širinu brtve unutar željenih granica točnosti,
3. prema jednadžbi (53) se dobivena nova vrijednost potrebne sile brtvljenja uspoređuje s pretpostavljenom silom brtvljenja, te se iteracija provodi do željene točnosti.

4.2.1 Prva iteracija

Iteracija započinje pretpostavljanjem sile brtvljenja prilikom sklapanja koja je prema [11] dana izrazom

$$F_{G0} = A_B \cdot \frac{f_{B0}}{3} = 52,222 \text{ kN} , \quad (9)$$

gdje se dopušteno naprezanje vijka prilikom sklapanja, f_{B0} računa prema jednadžbi (7) a efektivna površina svih vijaka prirubnice dana je izrazom

$$A_B = n_B \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{Be}^2 = 626,664 \text{ mm}^2 . \quad (10)$$

Pretpostavljamo efektivnu širinu brtve, b_{Ge} koja je dana izrazom

$$b_{Ge} = b_{Gt} = 20,5 \text{ mm} , \quad (11)$$

gdje teorijska širina brtve iznosi

$$b_{Gt} = \frac{d_{G2} - d_{G1}}{2} = 20,5 \text{ mm} . \quad (12)$$

Potrebno je izračunati privremenu širinu brtve danu izrazom

$$b_{Gi} = \sqrt{\frac{\frac{e_G}{\pi \cdot d_{Ge} \cdot E_{Gm}}}{h_{G0} \cdot \frac{Z_F}{E_{F0}} + h_{G0} \cdot \frac{Z_F}{E_{F0}}} + \left(\frac{F_{G0}}{\pi \cdot d_{Ge} \cdot Q_{\max}} \right)^2} = 23,874 \text{ mm} , \quad (13)$$

gdje su efektivni promjer brtve d_{Ge} , efektivni modul elastičnosti brtve E_{Gm} , krak djelovanja sile brtvljenja h_{G0} , rotacijski modul fleksibilnosti prirubnice Z_F dani izrazima

$$d_{Ge} = d_{G2} - b_{Ge} = 81,5 \text{ mm} , \quad (14)$$

$$E_{Gm} = E_0 + 0,5 \cdot K_1 \cdot \frac{F_{G0}}{A_{Ge}} = 699,493 \text{ MPa} , \quad (15)$$

$$h_{G0} = \frac{d_{3e} - d_{Ge}}{2} = 13,938 \text{ mm} , \quad (16)$$

$$Z_F = \frac{3 \cdot d_F \cdot c_F}{\pi \cdot b_F \cdot e_F^3} = 1,52 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{mm}^3} . \quad (17)$$

Za računanje efektivnog modula elastičnosti brtve E_{Gm} , potrebno je izračunati efektivnu površinu brtve, A_{Ge} danu izrazom

$$A_{Ge} = \pi \cdot d_{Ge} \cdot b_{Ge} = 5,249 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 . \quad (18)$$

Za računanje kraka djelovanja sile brtvljenja h_{G0} , potrebno je izračunati efektivni promjer brtve d_{Ge} , prema jednadžbi (14) i efektivni promjer kružnice vijaka prirubnice, d_{3e} dan izrazom

$$d_{3e} = d_3 \cdot \left(1 - \frac{2}{n_B^2} \right) = 109,375 \text{ mm} . \quad (19)$$

Za računanje rotacijskog modula fleksibilnosti prirubnice Z_F , potrebno je izračunati srednji promjer prstena prirubnice d_F , efektivnu širinu prirubnice b_F te korekcijski faktor prirubnice c_F , prema danim izrazima

$$d_F = \frac{(d_4 + d_0)}{2} = 109,75 \text{ mm} , \quad (20)$$

$$b_F = \frac{(d_4 - d_0)}{2} - d_{5e} = 47,543 \text{ mm} , \quad (21)$$

$$c_F = \frac{1 + \gamma \cdot \theta}{1 + \gamma \cdot \theta \cdot (4 \cdot (1 - 3 \cdot \lambda + 3 \cdot \lambda^2) + 6 \cdot (1 - 2 \cdot \lambda) + \theta + 6 \cdot \theta^2) + 3 \cdot \gamma^2 \cdot \theta^4} , \quad (22)$$

gdje su efektivni promjer provrta vijaka d_{5e} , pomoćni faktori γ , λ , θ , korak između vijaka p_B , dani izrazima

$$d_{5e} = d_5 \cdot \sqrt{\frac{d_5}{p_B}} = 7,707 \text{ mm} , \quad (23)$$

$$\gamma = \frac{(e_E \cdot d_F)}{(b_F \cdot d_E)} = 0,281 , \quad (24)$$

$$\lambda = 0 , \quad (25)$$

$$\theta = 0,550 \cdot \left(\frac{\sqrt{d_E \cdot e_E}}{e_F} \right) = 0,658 , \quad (26)$$

$$p_B = \pi \cdot \frac{d_3}{n_B} = 98,175 \text{ mm} . \quad (27)$$

Nakon računanja privremene širine brtve b_{Gi} , potrebno je odabrati efektivnu širinu brtve b_{Ge} , prema izrazu

$$b_{Ge} = \min\{b_{Gi}, b_{Gt}\} = 20,5 \text{ mm} . \quad (28)$$

4.2.1.1 Krakovi djelovanja sile

Krak sile brtvljenja h_G i krak resultantne sile h_H se računaju prema izrazima

$$h_G = \frac{d_{3e} - d_{Ge}}{2} = 13,938 \text{ mm} , \quad (29)$$

$$h_H = \frac{d_{3e} - d_E}{2} = 25,532 \text{ mm} , \quad (30)$$

gdje se ekvivalentni srednji promjer konusnog prstena prirubnice, d_E dobiva prema izrazu

$$d_E = \frac{(\min\{d_1 - e_1 + e_E, d_2 + e_2 - e_E\} + \max\{d_1 + e_1 - e_E, d_2 - e_2 + e_E\})}{2}, \quad (31)$$

u kojemu se ekvivalentna debljina konusnog prstena prirubnice, e_E dobiva izrazom

$$e_E = e_1 \cdot \left(1 + \frac{((\beta - 1) \cdot l_H)}{\left(\frac{\beta}{3}\right) \cdot \sqrt{d_1 \cdot e_1} + l_H} \right) = 7,099 \text{ mm}. \quad (32)$$

Prilikom računanja ekvivalentne debljine konusnog prstena prirubnice potrebno je izračunati pomoćni faktor, β prema izrazu

$$\beta = \frac{e_2}{e_1} = 3,534. \quad (33)$$

4.2.1.2 Sile

Ekvivalentna sila tlaka prilikom ispitivanja F_{QI} i vanjska ekvivalentna sila F_{RI} , nastala vanjskom aksijalnom silom i savojnim momentnom dobivaju se prema izrazima

$$F_{QI} = \frac{\pi \cdot d_{Ge}^2 \cdot P_l}{4} = 31,301 \text{ kN}, \quad (34)$$

$$F_{RI} = F_{AI} + M_{AI} \cdot \frac{4}{d_{3e}} = 36,571 \text{ kN}. \quad (35)$$

4.2.1.3 Faktori propusnosti sklopa u ispitnom stanju

Faktori propusnosti sklopa potrebni za računanje sile brtve u ispitnom stanju računaju se prema izrazima

$$Y_{GI} = Z_F \cdot \frac{h_G^2}{E_{FI}} + Z_F \cdot \frac{h_G^2}{E_{FI}} + \frac{X_B}{E_{BI}} + \frac{X_G}{E_{GI} \cdot g_C} = 1,248 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{N}}, \quad (36)$$

$$Y_{QI} = Z_F \cdot h_G \cdot \frac{h_H - h_P + h_Q}{E_{FI}} + Z_F \cdot h_G \cdot \frac{h_H - h_P + h_Q}{E_{FI}} + \frac{X_B}{E_{BI}} = 9,22 \cdot 10^{-7} \frac{\text{mm}}{\text{N}}, \quad (37)$$

$$Y_{RI} = Z_F \cdot h_G \cdot \frac{h_H + h_R}{E_{FI}} + Z_F \cdot h_G \cdot \frac{h_H + h_R}{E_{FI}} + \frac{X_B}{E_{BI}} = 9,243 \cdot 10^{-7} \frac{\text{mm}}{\text{N}}, \quad (38)$$

$$Y_{G0} = Z_F \cdot \frac{h_G^2}{E_{FI}} + Z_F \cdot \frac{h_G^2}{E_{FI}} + \frac{X_B}{E_{BI}} + \frac{X_G}{E_0 \cdot g_C} = 1,424 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{N}}, \quad (39)$$

gdje su E_{FI} , E_{BI} , E_{GI} moduli elastičnosti prirubnice, vijaka i brtve u ispitnom stanju; X_B , X_G aksijalni moduli fleksibilnosti vijaka i brtve; g_C faktor puzanja brtve; Z_F rotacijski modul fleksibilnosti prirubnice prema jednadžbi (17); h_G krak djelovanja sile brtvljenja prema jednadžbi (29); h_H krak djelovanja rezultantne sile prema jednadžbi (30); h_P , h_Q faktori korekcije krakova sile.

Modul elastičnosti brtve u ispitnom stanju dobiva se prema izrazu

$$E_{GI} = E_0 + K_1 \cdot Q = 798,986 \text{ MPa} , \quad (40)$$

gdje se srednje (postojeće) naprezanje brtve dobiva prema izrazu

$$Q = \frac{F_{G0}}{A_{Ge}} = 9,949 \text{ MPa} . \quad (41)$$

Aksijalni moduli fleksibilnosti vijaka i brtve, X_B , X_G dobiveni su prema izrazima

$$X_B = \frac{4}{n_B \cdot \pi} \cdot \left(\frac{l_s}{d_{Bs}^2} + \frac{l_e}{d_{Be}^2} + \frac{0,8}{d_{B0}} \right) = 0,092 \frac{1}{\text{mm}} , \quad (42)$$

$$X_G = \frac{e_G}{A_{Gt}} \cdot \frac{\left(\frac{b_{Gt} + e_G}{2} \right)}{\left(\frac{b_{Ge} + e_G}{2} \right)} = 3,81 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{mm}} . \quad (43)$$

Faktori korekcije krakova sile, h_P , h_Q dobiveni su prema izrazima

$$h_P = \frac{(d_{Ge} - d_E)^2 \cdot \frac{2 \cdot d_{Ge} + d_E}{6} + 2 \cdot e_P^2 \cdot d_F}{d_{Ge}^2} = 12,536 \text{ mm} , \quad (44)$$

$$h_Q = \left(h_s \cdot k_Q + h_T \cdot \left(2 \cdot d_F \cdot \frac{e_P}{d_E^2} \right) \right) \cdot \left(\frac{d_E}{d_{Ge}} \right)^2 = 11,051 \text{ mm} , \quad (45)$$

gdje su h_s , k_Q , h_T korekcijski faktori dobiveni prema izrazima

$$h_s = e_F \cdot 1,10 \cdot \sqrt{\frac{e_E}{d_E}} \cdot \frac{1 - 2 \cdot \lambda + \theta}{1 + \gamma \cdot \theta} = 9,131 \text{ mm} , \quad (46)$$

$$k_Q = 0,85 , \quad (47)$$

$$h_T = e_F \cdot \frac{1 - 2 \cdot \lambda + \gamma \cdot \theta^2}{1 + \gamma \cdot \theta} = 12,599 \text{ mm} . \quad (48)$$

4.2.1.4 Minimalne potrebne sile na prirubničkom spoju

Minimalna sila brtvljenja prilikom sklapanja prirubničkog spoja dobiva se prema izrazu

$$F_{G0,min} = A_{Ge} \cdot Q_{0,min} = 52,488 \text{ kN} , \quad (49)$$

gdje je A_{Ge} efektivna kontaktna površina brtve dobivena prema jednadžbi (18) a $Q_{0,min}$ minimalno potrebno naprezanje brtve prilikom sklapanja prirubničkog spoja ovisno o zadanom materijalu brtve.

Minimalna sila brtvljenja u ispitnom stanju dobiva se prema izrazu

$$F_{GI,min} = \max \left(A_{Ge} \cdot Q_{I,min} ; - (F_{QI} - F_{RI}) \right) = 40,941 \text{ kN} , \quad (50)$$

gdje je A_{Ge} efektivna kontaktna površina brtve dobivena prema jednadžbi (18), F_{QI} ekvivalentna sila tlaka prilikom ispitivanja prema jednadžbi (34), F_{RI} ekvivalentna sila vanjskih opterećenja prirubničkog spoja prema jednadžbi (35) a $Q_{I,min}$ minimalno potrebno naprezanje brtve u ispitnom stanju dobiveno izrazom

$$Q_{I,min} = m_I \cdot P_I = 7,8 \text{ MPa} , \quad (51)$$

u kojemu je m_I kompresijski faktor brtve a P_I tlak ispitivanja prirubničkog spoja prema jednadžbi (5).

Minimalna potrebna sila u vijcima prilikom sklapanja prirubničkog spoja dana je izrazom

$$F_{GA} = \frac{(F_{GI,min} \cdot Y_{GI} + F_{QI} \cdot Y_{GI} + F_{RI} \cdot Y_{RI})}{Y_{G0}} = 79,904 \text{ kN} , \quad (52)$$

gdje je $F_{GI,min}$ minimalna sila brtvljenja u ispitnom stanju dobivena prema jednadžbi (50), F_{QI} ekvivalentna sila tlaka prilikom ispitivanja prema jednadžbi (34), F_{RI} ekvivalentna sila vanjskih opterećenja prirubničkog spoja prema jednadžbi (35) a Y_{GI} , Y_{RI} , Y_{G0} su faktori propusnosti prirubničkog spoja dobiveni jednadžbama (36), (38) i (39).

Potrebna sila brtvljenja uzima se kao minimalna sila, između minimalne sile brtvljenja i minimalne potrebne sile u vijcima prilikom sklapanja prirubničkog spoja prema izrazu

$$F_{G0,req} = \max (F_{G0,min} ; F_{GA}) = 79,904 \text{ kN} . \quad (53)$$

Prema [11] (stranica 639. poglavlje G.5.4.1) odstupanje između pretpostavljene minimalne sile brtvljenja i izračunane potrebne sile brtvljenja mora biti u granicama od $\pm 5\%$, prema izrazu

$$F_{G0,req} \approx F_{G0} . \quad (54)$$

Pretpostavljena minimalna sila brtvljenja F_{G0} i izračunana potrebna sila brtvljenja $F_{G0,req}$ iznose

$$F_{G0} = 52,222 \text{ kN} ,$$

$$F_{G0,req} = 79,904 \text{ kN} ,$$

te je vidljivo da izračunane sile nisu unutar dopuštenih granica od $\pm 5\%$. Potrebno je napraviti drugu iteraciju sa novom pretpostavljenom silom kako bi se dobilo manje odstupanje.

4.2.2 Druga iteracija

Iteracija započinje pretpostavljanjem nove sile brtvljenja prilikom sklapanja koja je odabrana s iznosom

$$F_{G0} = 78,223 \text{ kN} \quad (55)$$

Potrebno je izračunati privremenu širinu brtve danu izrazom

$$b_{Gi} = \sqrt{\frac{\frac{e_G}{\pi \cdot d_{Ge} \cdot E_{Gm}}}{h_{G0} \cdot \frac{Z_F}{E_{F0}} + h_{G0} \cdot \frac{Z_F}{E_{F0}}} + \left(\frac{F_{G0}}{\pi \cdot d_{Ge} \cdot Q_{max}} \right)^2} = 23,539 \text{ mm} , \quad (56)$$

gdje su efektivni promjer brtve d_{Ge} , efektivni modul elastičnosti brtve E_{Gm} , krak djelovanja sile brtvljenja h_{G0} , rotacijski modul fleksibilnosti prirubnice Z_F dani izrazima

$$d_{Ge} = d_{G2} - b_{Ge} = 81,5 \text{ mm} , \quad (57)$$

$$E_{Gm} = E_0 + 0,5 \cdot K_1 \cdot \frac{F_{G0}}{A_{Ge}} = 749,03 \text{ MPa} , \quad (58)$$

$$h_{G0} = \frac{d_{3e} - d_{Ge}}{2} = 13,938 \text{ mm} , \quad (59)$$

$$Z_F = \frac{3 \cdot d_F \cdot c_F}{\pi \cdot b_F \cdot e_F^3} = 1,52 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{mm}^3} . \quad (60)$$

Za računanje efektivnog modula elastičnosti brtve E_{Gm} , potrebno je izračunati efektivnu površinu brtve, A_{Ge} danu izrazom

$$A_{Ge} = \pi \cdot d_{Ge} \cdot b_{Ge} = 5,249 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 . \quad (61)$$

Za računanje kraka djelovanja sile brtvljenja h_{G0} , potrebno je izračunati efektivni promjer brtve d_{Ge} , prema jednadžbi (57) i efektivni promjer kružnice vijaka prirubnice, d_{3e} dan izrazom

$$d_{3e} = d_3 \cdot \left(1 - \frac{2}{n_B^2}\right) = 109,375 \text{ mm} . \quad (62)$$

Za računanje rotacijskog modula fleksibilnosti prirubnice Z_F , potrebno je izračunati srednji promjer prstena prirubnice d_F , efektivnu širinu prirubnice b_F te korekcijski faktor prirubnice c_F , prema danim izrazima

$$d_F = \frac{(d_4 + d_0)}{2} = 109,75 \text{ mm} , \quad (63)$$

$$b_F = \frac{(d_4 - d_0)}{2} - d_{3e} = 47,543 \text{ mm} , \quad (64)$$

$$c_F = \frac{1 + \gamma \cdot \theta}{1 + \gamma \cdot \theta \cdot (4 \cdot (1 - 3 \cdot \lambda + 3 \cdot \lambda^2) + 6 \cdot (1 - 2 \cdot \lambda) + \theta + 6 \cdot \theta^2) + 3 \cdot \gamma^2 \cdot \theta^4} , \quad (65)$$

gdje su efektivni promjer provrta vijaka d_{3e} , pomoćni faktori γ , λ , θ , korak između vijaka p_B , dani izrazima

$$d_{3e} = d_3 \cdot \sqrt{\frac{d_5}{p_B}} = 7,707 \text{ mm} , \quad (66)$$

$$\gamma = \frac{(e_E \cdot d_F)}{(b_F \cdot d_E)} = 0,281 , \quad (67)$$

$$\lambda = 0 , \quad (68)$$

$$\theta = 0,550 \cdot \left(\frac{\sqrt{d_E \cdot e_E}}{e_F} \right) = 0,658 , \quad (69)$$

$$p_B = \pi \cdot \frac{d_3}{n_B} = 98,175 \text{ mm} . \quad (70)$$

Nakon računanja privremene širine brtve, b_{Gi} , potrebno je odabrati efektivnu širinu brtve b_{Ge} , prema izrazu

$$b_{Ge} = \min \{b_{Gi}, b_{Gt}\} = 20,5 \text{ mm} . \quad (71)$$

4.2.2.1 Krakovi djelovanja sile

Krak sile brtvljenja h_G i krak rezultantne sile h_H računaju se prema izrazima

$$h_G = \frac{d_{3e} - d_{Ge}}{2} = 13,938 \text{ mm} , \quad (72)$$

$$h_H = \frac{d_{3e} - d_E}{2} = 25,532 \text{ mm} , \quad (73)$$

gdje se ekvivalentni srednji promjer konusnog prstena prirubnice, d_E dobiva prema izrazu

$$d_E = \frac{(\min \{d_1 - e_1 + e_E; d_2 + e_2 - e_E\} + \max \{d_1 + e_1 - e_E; d_2 - e_2 + e_E\})}{2} , \quad (74)$$

u kojemu se ekvivalentna debljina konusnog prstena prirubnice, e_E dobiva izrazom

$$e_E = e_1 \cdot \left(1 + \frac{((\beta - 1) \cdot l_H)}{\left(\frac{\beta}{3}\right) \cdot \sqrt{d_1 \cdot e_1} + l_H} \right) = 7,099 \text{ mm} . \quad (75)$$

Prilikom računanja ekvivalentne debljine konusnog prstena prirubnice potrebno je izračunati pomoćni faktor, β prema izrazu

$$\beta = \frac{e_2}{e_1} = 3,534 . \quad (76)$$

4.2.2.2 Sile

Ekvivalentna sila tlaka prilikom ispitivanja, F_{Qi} i vanjska ekvivalentna sila, F_{Ri} , nastala vanjskom aksijalnom silom i savojnim momentnom dobivaju se prema izrazima

$$F_{Qi} = \frac{\pi \cdot d_{Ge}^2 \cdot P}{4} = 31,301 \text{ kN} , \quad (77)$$

$$F_{Ri} = F_{Ai} + M_{Ai} \cdot \frac{4}{d_{3e}} = 36,571 \text{ kN} . \quad (78)$$

4.2.2.3 Faktori propusnosti sklopa u ispitnom stanju

Faktori propusnosti sklopa potrebni za računanje sile brtve u ispitnom stanju računaju se prema izrazima

$$Y_{GI} = Z_F \cdot \frac{h_G^2}{E_{FI}} + Z_F \cdot \frac{h_G^2}{E_{FI}} + \frac{X_B}{E_{BI}} + \frac{X_G}{E_{GI} \cdot g_C} = 1,189 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{N}}, \quad (79)$$

$$Y_{QI} = Z_F \cdot h_G \cdot \frac{h_H - h_P + h_Q}{E_{FI}} + Z_F \cdot h_G \cdot \frac{h_H - h_P + h_Q}{E_{FI}} + \frac{X_B}{E_{BI}} = 9,22 \cdot 10^{-7} \frac{\text{mm}}{\text{N}}, \quad (80)$$

$$Y_{RI} = Z_F \cdot h_G \cdot \frac{h_H + h_R}{E_{FI}} + Z_F \cdot h_G \cdot \frac{h_H + h_R}{E_{FI}} + \frac{X_B}{E_{BI}} = 9,243 \cdot 10^{-7} \frac{\text{mm}}{\text{N}}, \quad (81)$$

$$Y_{G0} = Z_F \cdot \frac{h_G^2}{E_{FI}} + Z_F \cdot \frac{h_G^2}{E_{FI}} + \frac{X_B}{E_{BI}} + \frac{X_G}{E_0 \cdot g_C} = 1,424 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{N}}, \quad (82)$$

gdje su E_{FI} , E_{BI} , E_{GI} moduli elastičnosti prirubnice, vijaka i brtve u ispitnom stanju; X_B , X_G aksijalni moduli fleksibilnosti vijaka i brtve; g_C faktor puzanja brtve; Z_F rotacijski modul fleksibilnosti prirubnice prema jednadžbi (60); h_G krak djelovanja sile brtvljenja prema jednadžbi (72); h_H krak djelovanja rezultantne sile prema jednadžbi (73); h_P , h_Q faktori korekcije krakova sile.

Modul elastičnosti brtve u ispitnom stanju dobiva se prema izrazu

$$E_{GI} = E_0 + K_1 \cdot Q = 898,06 \text{ MPa}, \quad (83)$$

gdje se srednje (postojeće) naprezanje brtve dobiva prema izrazu

$$Q = \frac{F_{G0}}{A_{Ge}} = 14,903 \text{ MPa}. \quad (84)$$

Aksijalni moduli fleksibilnosti vijaka i brtve, X_B , X_G dobiveni su prema izrazima

$$X_B = \frac{4}{n_B \cdot \pi} \cdot \left(\frac{l_s}{d_{Bs}^2} + \frac{l_e}{d_{Be}^2} + \frac{0,8}{d_{B0}} \right) = 0,092 \frac{1}{\text{mm}}, \quad (85)$$

$$X_G = \frac{e_G}{A_{Gt}} \cdot \frac{\left(\frac{b_{Gt} + e_G}{2} \right)}{\left(\frac{b_{Ge} + e_G}{2} \right)} = 3,81 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{mm}}. \quad (86)$$

Faktori korekcije krakova sila, h_P , h_Q dobiveni su prema izrazima

$$h_P = \frac{(d_{Ge} - d_E)^2 \cdot \frac{2 \cdot d_{Ge} + d_E}{6} + 2 \cdot e_P^2 \cdot d_F}{d_{Ge}^2} = 12,536 \text{ mm} , \quad (87)$$

$$h_Q = \left(h_S \cdot k_Q + h_T \cdot \left(2 \cdot d_F \cdot \frac{e_P}{d_E^2} \right) \right) \cdot \left(\frac{d_E}{d_{Ge}} \right)^2 = 11,051 \text{ mm} , \quad (88)$$

gdje su h_S , k_Q , h_T korekcijski faktori dobiveni prema izrazima

$$h_S = e_F \cdot 1,10 \cdot \sqrt{\frac{e_E}{d_E}} \cdot \frac{1 - 2 \cdot \lambda + \theta}{1 + \gamma \cdot \theta} = 9,131 \text{ mm} , \quad (89)$$

$$k_Q = 0,85 , \quad (90)$$

$$h_T = e_F \cdot \frac{1 - 2 \cdot \lambda + \gamma \cdot \theta^2}{1 + \gamma \cdot \theta} = 12,599 \text{ mm} . \quad (91)$$

4.2.2.4 Minimalne potrebne sile prirubničkog spoja

Minimalna sila brtvljenja prilikom sklapanja prirubničkog spoja dobiva se prema izrazu

$$F_{G0,min} = A_{Ge} \cdot Q_{0,min} = 52,488 \text{ kN} , \quad (92)$$

gdje je A_{Ge} efektivna kontaktna površina brtve dobivena prema jednadžbi (18) a $Q_{0,min}$ minimalno potrebno naprezanje brtve prilikom sklapanja prirubničkog spoja ovisno o zadanom materijalu brtve.

Minimalna sila brtvljenja u ispitnom stanju dobiva se prema izrazu

$$F_{G1,min} = \max \left(A_{Ge} \cdot Q_{1,min} , - (F_{QI} - F_{RI}) \right) = 40,941 \text{ kN} , \quad (93)$$

gdje je A_{Ge} efektivna kontaktna površina brtve dobivena prema jednadžbi (61), F_{QI} ekvivalentna sila tlaka prilikom ispitivanja prema jednadžbi (77), F_{RI} ekvivalentna sila vanjskih opterećenja prirubničkog spoja prema jednadžbi (78) a $Q_{1,min}$ minimalno potrebno naprezanje brtve u ispitnom stanju dobiveno izrazom

$$Q_{1,min} = m_1 \cdot P_1 = 7,8 \text{ MPa} , \quad (94)$$

u kojemu je m_1 kompresijski faktor brtve a P_1 tlak ispitivanja prirubničkog spoja prema jednadžbi (5).

Minimalna potrebna sila u vijcima prilikom sklapanja prirubničkog spoja dana je izrazom

$$F_{G\Delta} = \frac{(F_{GI,min} \cdot Y_{GI} + F_{QI} \cdot Y_{GI} + F_{RI} \cdot Y_{RI})}{Y_{G0}} = 78,223 \text{ kN}, \quad (95)$$

gdje je $F_{GI,min}$ minimalna sila brtvljenja u ispitnom stanju dobivena prema jednadžbi (93), F_{QI} ekvivalentna sila tlaka prilikom ispitivanja prema jednadžbi (77), F_{RI} ekvivalentna sila vanjskih opterećenja prirubničkog spoja prema jednadžbi (78) a Y_{GI} , Y_{RI} , Y_{G0} su faktori propusnosti prirubničkog spoja dobiveni jednadžbama (79), (81) i (82).

Potrebna sila brtvljenja uzima se kao minimalna sila, između minimalne sile brtvljenja i minimalne potrebne sila u vijcima prilikom sklapanja prirubničkog spoja prema izrazu

$$F_{G0,req} = \max(F_{G0,min}, F_{G\Delta}) = 78,223 \text{ kN}. \quad (96)$$

Prema [11] (stranica 639. poglavlje G.5.4.1) odstupanje između pretpostavljene minimalne sile brtvljenja i izračunane potrebne sile brtvljenja mora biti u granicama od $\pm 5\%$, prema izrazu

$$F_{G0,req} \approx F_{G0}. \quad (97)$$

Pretpostavljena minimalna sila brtvljenja F_{G0} i izračunana potrebna sila brtvljenja $F_{G0,req}$ iznose

$$F_{G0} = 78,223 \text{ kN},$$

$$F_{G0,req} = 78,223 \text{ kN},$$

te je vidljivo da su izračunane sile unutar dopuštenih granica od $\pm 5\%$. Za nastavak proračuna uzimaju se vrijednosti dobivene drugom iteracijom.

4.3 Rasipanje sile vijaka

Prilikom pritezanja prirubničkog sklopa, svaka metoda stezanja daje određeni stupanj pogreške, tj. sile na pojedinim vijcima nisu jednake te je potrebno prilikom proračuna uzeti u obzir i raspršivanje sile vijaka. Potrebno je izračunati faktore rasipanja sile vijaka (jednadžbe (98) i (99)), kao minimalne i maksimalne sile koje bi se trebale dobiti stezanjem vijaka određenom metodom stezanja. Za metodu stezanja je odabrana metoda stezanja momentnim ključem.

Faktori rasipanja sile vijaka ispod nominalne vrijednosti ε_{n-} i iznad nominalne vrijednosti ε_{n+} sile dani su izrazima

$$\varepsilon_{n+} = \varepsilon_{1+} \cdot \frac{1 + \frac{3}{\sqrt{n_B}}}{4} = 0,109, \quad (98)$$

$$\varepsilon_{n-} = \varepsilon_{1-} \cdot \frac{1 + \frac{3}{\sqrt{n_B}}}{4} = 0,109, \quad (99)$$

gdje je n_B broj vijaka prirubnice, dok su ε_{1+} i ε_{1-} faktori rasipanja ovisni o metodi pritezanja. Za metodu pritezanja momentnim ključem faktori rasipanja se dobivaju prema izrazima

$$\varepsilon_{1+} = 0,1 + 0,5 \cdot \mu, \quad (100)$$

$$\varepsilon_{1-} = 0,1 + 0,5 \cdot \mu. \quad (101)$$

4.4 Sile vijaka i brtve prilikom sklapanja prirubničkog spoja

Proračun sila vijaka mora biti unutar granica definiranih izrazom

$$F_{B0,min} \leq F_{B0} \leq F_{B0,max}. \quad (102)$$

Nominalna sila vijka prilikom sklapanja prirubničkog spoja dana je izrazom

$$F_{B0,nom} = F_{B0,req} \cdot \frac{1,1}{1 - \varepsilon_{n-}} = 96,612 \text{ kN}, \quad (103)$$

gdje je $F_{B0,req}$ potrebna sila vijaka jednaka potrebnoj sili brtvljenja $F_{G0,req}$ izračunanoj prema jednadžbi (96) a ε_{n-} faktor raspršivanja ispod nominalne vrijednosti sile vijka prema jednadžbi (99).

Maksimalna i minimalno moguća sila vijaka prilikom sklapanja prirubničkog spoja uzimajući u obzir raspršivanje sile računa se prema izrazima

$$F_{B0,max} = F_{B0,nom} \cdot (1 + \varepsilon_{n+}) = 107,179 \text{ kN} , \quad (104)$$

$$F_{B0,min} = F_{B0,nom} \cdot (1 - \varepsilon_{n+}) = 86,045 \text{ kN} , \quad (105)$$

gdje je $F_{B0,nom}$ nominalna sila vijka prema jednadžbi (103) a ε_{n+} i ε_{n-} su faktori raspršivanja sile vijaka prema jednadžbama (98) i (99).

Maksimalna i minimalno moguća sila na brtvi prilikom sklapanja prirubničkog spoja uzimajući u obzir raspršivanje sile računa se prema izrazima

$$F_{G0,max} = F_{B0,max} - F_{R0} = 107,179 \text{ kN} , \quad (106)$$

$$F_{G0,min} = F_{B0,min} - F_{R0} = 86,045 \text{ kN} , \quad (107)$$

gdje su $F_{B0,max}$ i $F_{B0,min}$ maksimalne i minimalne sile u vijcima dobivene jednadžbama (104) i (105) a F_{R0} ekvivalentna sila vanjskih opterećenja prirubnice dobivena izrazom

$$F_{R0} = F_{A0} \cdot M_{A0} \cdot \frac{4}{d_{3e}} = 0 \text{ N} . \quad (108)$$

Za kontrolu sigurnosti vijaka uzima se maksimalno granična sila vijaka prilikom sklapanja prirubničkog spoja uključujući raspršivanje sile

$$F_{B0} = F_{B0,max} = 107,179 \text{ kN} . \quad (109)$$

4.5 Sile brtve i vijaka u pogonskom (ispitnom) stanju

Sile brtve i vijaka u ispitnom stanju prirubničkog spoja dane su izrazima

$$F_{GI} = \frac{F_{G0,d} \cdot Y_{G0} - (F_{QI} \cdot Y_{QI} + (F_{RI} \cdot Y_{RI}))}{Y_{GI}} = 40,941 \text{ kN} , \quad (110)$$

$$F_{BI} = F_{GI} + F_{QI} + F_{RI} = 108,813 \text{ kN} , \quad (111)$$

gdje je $F_{G0,d}$ konstrukcijska sila brtve prema jednadžbi (112), F_{QI} ekvivalentna sila tlaka prilikom ispitivanja prema jednadžbi (77), F_{RI} ekvivalentna sila vanjskih opterećenja prirubničkog spoja prema jednadžbi (78) a Y_{GI} , Y_{QI} , Y_{RI} , Y_{G0} , su faktori propusnosti prirubničkog spoja dobiveni jednadžbama (79), (80), (81) i (82).

Konstruktivska sila brtve dobiva se prema izrazu

$$F_{G0,d} = \max \left\{ F_{G\Delta}, \frac{2}{3} \cdot \left(1 - \frac{10}{N_R} \right) \cdot F_{B0,max} \right\} = 78,223 \text{ kN}, \quad (112)$$

gdje je $F_{G\Delta}$ minimalna potrebna sila u vijcima prilikom sklapanja prirubničkog spoja prema jednadžbi (95), $F_{B0,max}$ maksimalna sila vijaka prilikom sklapanja prirubničkog spoja uzimajući u obzir raspršivanje sile vijaka prema jednadžbi (109) a N_R pretpostavljeni broj rastavljanja prirubničkog spoja unutar radnog vijeka.

4.6 Sigurnost spoja

Prirubnički spoj mora zadovoljiti uvjete sigurnosti koji se odnose na prirubnicu, vijke i brtvu. Uvjeti sigurnosti računaju se omjerima opterećenja prirubničkog spoja.

Uvjet koji mora zadovoljiti prirubnički spoj u svim fazama opterećenja (sklapanje, ispitivanje) dan je izrazom

$$\phi \leq 1. \quad (113)$$

Ukoliko je omjer geometrijskih vrijednosti prirubnice veći od definiranog izrazom

$$\chi = \frac{d_4}{d_0} = 3,028 \leq 2, \quad (114)$$

vrijedi reducirani maksimalno dozvoljeni omjer opterećenja

$$\phi \leq \phi_{\max} = \min \left\{ 1, 0,6 + \frac{1}{\sqrt{5,25 + (\chi - 1)^2}} \right\} = 0,927. \quad (115)$$

4.6.1 Sigurnost vijaka

Sigurnost vijaka prilikom sklapanja prirubničkog spoja ϕ_{B0} i sigurnost vijaka u ispitnom stanju ϕ_{BI} dani su izrazima

$$\phi_{B0} = \frac{F_{B0}}{A_B \cdot f_{B0}} \cdot \sqrt{1 + (C \cdot 3,2 \cdot \mu)^2} = 0,759, \quad (116)$$

$$\phi_{BI} = \frac{F_{BI}}{A_B \cdot f_{BI}} \cdot \sqrt{1 + (C \cdot 3,2 \cdot \mu)^2} = 0,77, \quad (117)$$

gdje je F_{B0} maksimalna sila vijaka prilikom sklapanja prirubničkog spoja uzimajući u obzir raspršivanje sile vijaka prema jednadžbi (109), F_{BI} sila vijaka u ispitnom stanju prema

jednadžbi (111), A_B efektivna površina svih vijaka prirubnice prema jednadžbi (10), f_{B0} dopušteno naprezanje vijaka prilikom sklapanja prirubničkog spoja prema jednadžbi (7), f_{BI} dopušteno naprezanje vijaka u ispitnom stanju prema jednadžbi (8), μ faktor trenja prilikom pritezanja prirubničkog spoja, C faktor ovisan od metode pritezanja prirubničkog spoja i za pritezanje momentnim ključem $C = 1$.

Vijčani spoj prirubničkog sklopa mora zadovoljavati sljedeće uvjete

$$\phi_{B0} \leq \phi_{\max} , \quad (118)$$

$$\phi_{BI} \leq \phi_{\max} , \quad (119)$$

gdje je ϕ_{\max} reducirani maksimalno dozvoljeni omjer opterećenja prema jednadžbi (115). Izračunane vrijednosti su manje od dozvoljenog omjera opterećenja, stoga vijčani spoj zadovoljava tražene uvjete sigurnosti.

4.6.2 Sigurnost brtve

Sigurnost brtve prilikom sklapanja prirubničkog spoja ϕ_{B0} i sigurnost brtve u ispitnom stanju ϕ_{GI} dani su izrazima

$$\phi_{G0} = \frac{F_{G0}}{A_{Gt} \cdot c_G \cdot Q_{\max}} = 0,27 , \quad (120)$$

$$\phi_{GI} = \frac{F_{GI}}{A_{Gt} \cdot c_G \cdot Q_{\max}} = 0,103 , \quad (121)$$

gdje je F_{G0} sila brtvljenja prilikom sklapanja prirubničkog spoja prema jednadžbi (96), F_{GI} sila brtvljenja u ispitnom stanju prema jednadžbi (110), A_{Gt} teorijska kontaktna površina brtve prema jednadžbi (123), Q_{\max} maksimalno dozvoljeno naprezanje brtve ovisno o materijalu brtve, c_G korekcijski faktor brtve prema jednadžbi (122).

Korekcijski faktor brtve, c_G i teorijska kontaktna površina brtve, A_{Gt} dane su izrazima

$$c_G = 1 + \frac{b_{Gt}}{20 \cdot e_G} = 1,513 , \quad (122)$$

$$A_{Gt} = \pi \cdot d_{Gt} \cdot b_{Gt} = 5,249 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 , \quad (123)$$

gdje je b_{Gt} teorijska širina brtve prema jednadžbi (12), e_G aksijalna debljina brtve a d_{Gt} teorijski srednji promjer brtve dan izrazom

$$d_{Gt} = \frac{d_{G2} + d_{G1}}{2} = 81,5 \text{ mm} . \quad (124)$$

Brтва prirubničkog spoja mora zadovoljavati sljedeće uvjete

$$\phi_{G0} \leq \phi_{\max} , \quad (125)$$

$$\phi_{GI} \leq \phi_{\max} , \quad (126)$$

gdje je ϕ_{\max} reducirani maksimalno dozvoljeni omjer opterećenja prema jednadžbi (115). Izračunane vrijednosti su manje od dozvoljenog omjera opterećenja, stoga brtva zadovoljava tražene uvjete sigurnosti.

4.6.3 Sigurnost prirubnice

Sigurnost prirubnice ϕ_{GI} prilikom ispitivanja računa se prema izrazu

$$\phi_{FI} = \frac{|F_{GI} \cdot h_G + F_{QI} \cdot (h_H - h_P) + F_{RI} \cdot h_H|}{W_F} = 0,448 , \quad (127)$$

gdje je F_{GI} sila brtvljenja u ispitnom stanju prema jednadžbi (110), F_{QI} ekvivalentna sila tlaka prilikom ispitivanja prema jednadžbi (77), F_{RI} ekvivalentna sila vanjskih opterećenja prirubničkog spoja prema jednadžbi (78), h_G krak djelovanja sile brtvljenja prema jednadžbi (72), h_H krak djelovanja rezultatne sile prema jednadžbi (73), h_P , faktor korekcije kraka djelovanja sila prema jednadžbi (87) a W_F moment otpora prirubnice računa se prema danom izrazu

$$W_F = \frac{\pi}{4} \cdot \left(f_F \cdot 2 \cdot b_F \cdot e_F^2 \cdot (1 + 2 \cdot \psi_{opt} \cdot \psi_Z - \psi_Z^2) + f_E \cdot d_E \cdot e_D^2 \cdot C_M \cdot j_M \cdot k_M \right) , \quad (128)$$

u kojemu je f_F dopušteno naprezanje prema jednadžbi (3), b_F je efektivna širina prirubnice prema jednadžbi (64), e_F efektivna aksijalna debljina prirubnice, ψ_{opt} optimalan omjer opterećenja prirubnice radi radijalne sile prema jednadžbi (135), ψ_Z očitani omjer opterećenja prirubnice radi radijalne sile, f_E dopušteno naprezanje prema jednadžbi (130), d_E ekvivalentni srednji promjer konusnog prstena prirubnice prema jednadžbi (74), e_D ekvivalentna debljina prstena prirubnice prema jednadžbi (129), C_M korekcijski faktor prirubnice prema jednadžbi (132), j_M predznak (signum) funkcija momenta prema jednadžbi (131), k_M očitani faktor prirubnice.

Ekvivalentna debljina prstena prirubnice e_D , dopušteno naprezanje f_E , predznak (signum) funkcija momenta j_M dani su izrazima

$$e_D = e_1 \cdot \left(1 + \frac{(\beta - 1) \cdot l_H}{\sqrt[4]{\left(\frac{\beta}{3}\right)^4 \cdot (d_1 \cdot e_1)^2 + l_H^4}} \right) = 9,761 \text{ mm} , \quad (129)$$

$$f_E = \min \{ f_F, f_S \} , \quad (130)$$

$$j_M = \text{sign} \{ F_{GI} \cdot h_G + F_{QI} \cdot (h_H - h_P) + F_{RI} \cdot h_H \} = 1 . \quad (131)$$

Korekcijski faktor prirubnice, C_M računa se prema izrazu

$$C_M = \sqrt[4]{1,333 \cdot \left(1 - 0,75 \cdot (0,5 \cdot \delta_Q \cdot \delta_R)^2 \right) \cdot \left(1 - (0,75 \cdot \delta_Q^2 + 1 \cdot \delta_R^2) \right)} = 1,102 , \quad (132)$$

gdje su δ_Q i δ_R pomoćni faktori dani izrazima

$$\delta_Q = P_I \cdot \frac{d_E}{f_E \cdot 2 \cdot e_D} = 0,149 , \quad (133)$$

$$\delta_R = \frac{F_{RI}}{f_E \cdot \pi \cdot d_E \cdot e_D} = 0,17 . \quad (134)$$

Optimalan omjer opterećenja prirubnice radi radijalne sile, ψ_{opt} dobiva se pomoću izraza

$$\psi_{\text{opt}} = j_M \cdot \left(2 \cdot \frac{e_P}{e_F} - 1 \right) = 1 . \quad (135)$$

4.6.3.1 Određivanje faktora ψ_Z i k_M

Omjer opterećenja prirubnice radi radijalne sile, ψ_Z i faktor prirubnice, k_M dobivaju se očitanjem tablice G.7.1 prema [11].

Potrebno je izračunati faktore ψ_{max} i ψ_0 prema izrazima

$$\psi_{\text{max}} = \psi_{(+1,+1,+1)} = 0,24 , \quad (136)$$

$$\psi_0 = \psi_{(0,0,0)} = 0,056 , \quad (137)$$

gdje se $\psi_{(j_S, k_M, k_S)}$ računa prema sljedećem izrazu

$$\psi_{(j_S, k_M, k_S)} = \frac{f_E \cdot d_E \cdot e_D}{f_L \cdot 2 \cdot b_F \cdot e_F} \cdot \left((0,5 \cdot \delta_Q + \delta_R) - \frac{\delta_Q \cdot 2 \cdot e_P}{d_E} + j_S \cdot k_S \cdot \sqrt{\frac{e_D \cdot C_M \cdot C_S \cdot (1 + j_S \cdot k_M)}{d_E}} \right). \quad (138)$$

Korekcijski faktor, C_S potreban za jednadžbu (138) računa se prema

$$C_S = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\sqrt{1 - 0,75 \cdot (0,5 \cdot \delta_Q + \delta_R)^2} + j_S \cdot (0,5 \cdot \delta_Q - 0,75 \cdot \delta_R) \right). \quad (139)$$

Za $\psi_{(+1, +1, +1)}$ slijedi da su

$$j_{S1} = +1, \quad k_{M1} = +1, \quad k_{S1} = +1$$

i jednadžbe (138) i (139) dobivaju oblik

$$C_{S1} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\sqrt{1 - 0,75 \cdot (0,5 \cdot \delta_Q + \delta_R)^2} + j_{S1} \cdot (0,5 \cdot \delta_Q - 0,75 \cdot \delta_R) \right) = 0,746, \quad (140)$$

$$\psi_{(+1, +1, +1)} = \frac{f_E \cdot d_E \cdot e_D}{f_L \cdot 2 \cdot b_F \cdot e_F} \cdot \left((0,5 \cdot \delta_Q + \delta_R) - \frac{\delta_Q \cdot 2 \cdot e_P}{d_E} + j_{S1} \cdot k_{S1} \cdot \sqrt{\frac{e_D \cdot C_M \cdot C_{S1} \cdot (1 + j_{S1} \cdot k_{M1})}{d_E}} \right) = 0,24. \quad (141)$$

Za $\psi_{(0,0,0)}$ slijedi da su

$$j_{S0} = 0, \quad k_{M0} = 0, \quad k_{S0} = 0$$

i jednadžbe (138) i (139) dobivaju oblik

$$C_{S0} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\sqrt{1 - 0,75 \cdot (0,5 \cdot \delta_Q + \delta_R)^2} + j_{S0} \cdot (0,5 \cdot \delta_Q - 0,75 \cdot \delta_R) \right) = 0,767, \quad (142)$$

$$\psi_{(0,0,0)} = \frac{f_E \cdot d_E \cdot e_D}{f_L \cdot 2 \cdot b_F \cdot e_F} \cdot \left((0,5 \cdot \delta_Q + \delta_R) - \frac{\delta_Q \cdot 2 \cdot e_P}{d_E} + j_{S0} \cdot k_{S0} \cdot \sqrt{\frac{e_D \cdot C_M \cdot C_{S0} \cdot (1 + j_{S0} \cdot k_{M0})}{d_E}} \right) = 0,056. \quad (143)$$

Prema [11], stranica 644. tablica G.7.1 za

$$j_M = +1, \quad \psi_{\max} \leq \psi_{\text{opt}},$$

slijedi da je:

$$k_M = +1$$

$$\psi_Z = \psi_{\max} = 0,24 \quad (144)$$

Prirubnica mora zadovoljavati sljedeće uvjete

$$\phi_{\text{FI}} \leq \phi_{\max}, \quad (145)$$

gdje je ϕ_{\max} reducirani maksimalno dozvoljeni omjer opterećenja prema jednadžbi (115). Izračunane vrijednosti su manje od dozvoljenog omjera opterećenja, stoga prirubnica zadovoljava tražene uvjete sigurnosti.

4.7 Stezanje momentnim ključem

Pritezanje prirubničkog spoja ostvaruje se momentnim ključem za koji je potrebno izračunati nominalni moment prilikom pritezanja vijaka za izračunatu nominalnu silu vijaka. Nakon računanja nominalnog momenta, potrebno je provesti kontrolu sigurnosti vijaka s modificiranim jednadžbama (jednadžbe (148), (149)).

Potrebni nominalni moment momentnog ključa se određuje prema izrazu

$$M_{t,\text{nom}} = k_B \cdot \frac{F_{B0,\text{nom}}}{n_B} = 75,551 \text{ Nm}, \quad (146)$$

gdje je $F_{B0,\text{nom}}$ nominalna sila vijaka prilikom sklapanja prema jednadžbi (103), n_B broj vijaka prirubnice a k_B pomoćni faktor dan izrazom

$$k_B = 0,16 \cdot p_t + 1,17 \cdot \mu \cdot d_{B0} = 3,128 \text{ mm}. \quad (147)$$

Kontrola sigurnosti vijaka prilikom sklapanja prirubničkog spoja ϕ_{B0} i sigurnost vijaka u ispitnom stanju ϕ_{BI} dana je izrazima

$$\phi_{B0} = \frac{F_{B0}}{A_B \cdot f_{B0}} \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot \left(\mu \cdot \frac{3 \cdot 0,55 \cdot d_{B0}}{d_{Be}} \right)^2} = 0,761, \quad (148)$$

$$\phi_{BI} = \frac{F_{BI}}{A_B \cdot f_{BI}} \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot \left(\mu \cdot \frac{3 \cdot 0,55 \cdot d_{B0}}{d_{Be}} \right)^2} = 0,772, \quad (149)$$

gdje je F_{B0} maksimalna sila vijaka prilikom sklapanja prirubničkog spoja uzimajući u obzir raspršivanje sile vijaka prema jednadžbi (109), F_{BI} sila vijaka u ispitnom stanju prema jednadžbi (111), A_B efektivna površina svih vijaka prirubnice prema jednadžbi (10), f_{B0} dopušteno naprezanje vijaka prilikom sklapanja prirubničkog spoja prema jednadžbi (7), f_{BI} dopušteno naprezanje vijaka u ispitnom stanju prema jednadžbi (8), μ faktor trenja prilikom pritezanja prirubničkog spoja, d_{B0} nazivni promjer vijka, d_{Be} srednji efektivni promjer vijka prema jednadžbi (6).

Vijčani spoj prirubničkog sklopa mora zadovoljavati sljedeće uvjete

$$\phi_{B0} \leq \phi_{max}, \quad (150)$$

$$\phi_{BI} \leq \phi_{max}, \quad (151)$$

gdje je ϕ_{max} reducirani maksimalno dozvoljeni omjer opterećenja prema jednadžbi (115). Izračunane vrijednosti su manje od dozvoljenog omjera opterećenja, stoga vijčani spoj zadovoljava tražene uvjete sigurnosti.

4.8 Rotacije prirubnica

Rotacijski kutovi prirubnica se računaju uzimajući u obzir rasipanje sile vijaka, dobivajući maksimalni i minimalni kut rotacije prirubnica u ispitnom stanju.

$$\theta_{FI,min} = \left(\frac{Z_F}{E_{FI}} \right) \cdot \left(F_{GI,min} \cdot h_G + F_{QI} \cdot (h_H - h_P + h_Q) + F_{RI} \cdot (h_H + h_R) \right) = 0,097^\circ, \quad (152)$$

$$\theta_{FI,max} = \left(\frac{Z_F}{E_{FI}} \right) \cdot \left(F_{GI,max} \cdot h_G + F_{QI} \cdot (h_H - h_P + h_Q) + F_{RI} \cdot (h_H + h_R) \right) = 0,112^\circ, \quad (153)$$

gdje je Z_F rotacijski modul fleksibilnosti prirubnice prema jednadžbi (60), E_{FI} modul elastičnosti prirubnice, h_G krak djelovanja sile brtvljenja prema jednadžbi (72), h_H krak djelovanja rezultantne sile prema jednadžbi (73), h_P faktor korekcije kraka djelovanja sila prema jednadžbi (87), h_Q , h_R faktori korekcije krakova sila prema jednadžbama (87), (88), (158), F_{QI} ekvivalentna sila tlaka prilikom ispitivanja prema jednadžbi (77), F_{RI} ekvivalentna

sila vanjskih opterećenja prirubničkog spoja prema jednadžbi (78), dok su minimalne i maksimalne sile brtve i vijaka u ispitnom stanju, $F_{GI,max}$, $F_{GI,min}$, $F_{BI,max}$, $F_{BI,min}$ dane izrazima

$$F_{GI,min} = \frac{(F_{G0,min} \cdot Y_{G0} - (F_{QI} \cdot Y_{QI} + F_{RI} \cdot Y_{RI}))}{Y_{GI}} = 50,303 \text{ kN}, \quad (154)$$

$$F_{GI,max} = \frac{(F_{G0,max} \cdot Y_{G0} - (F_{QI} \cdot Y_{QI} + F_{RI} \cdot Y_{RI}))}{Y_{GI}} = 75,598 \text{ kN}, \quad (155)$$

$$F_{BI,min} = F_{GI,min} + F_{QI} + F_{RI} = 118,176 \text{ kN}, \quad (156)$$

$$F_{BI,max} = F_{GI,max} + F_{QI} + F_{RI} = 143,471 \text{ kN}, \quad (157)$$

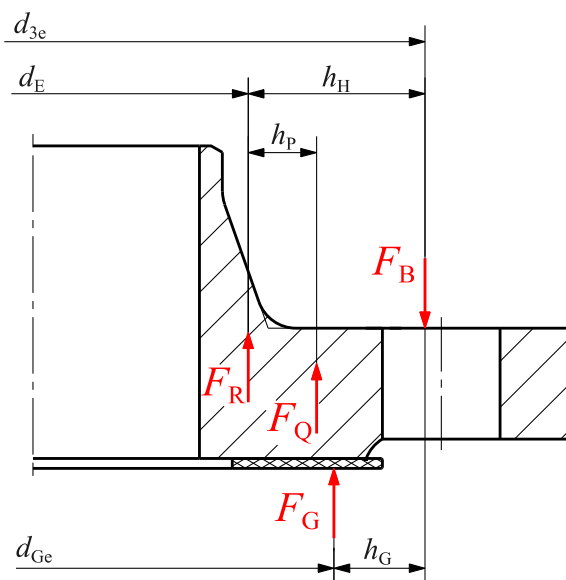
Računanje dodatnog faktora korekcije kraka djelovanja resultantne sile dobiva se izrazom

$$h_R = h_S \cdot k_R = -1,37 \text{ mm}, \quad (158)$$

gdje je h_S korekcijski faktor prema jednadžbi (89) a h_R korekcijski faktor koji iznosi -0,15.

4.9 Izračunane vrijednosti prirubničkog spoja

Na slici 12. prikazana su opterećenja prirubnice u ispitnoj fazi s pridruženim krakovima djelovanja sila. U tablicama 7. i 8. dane su izračunane izlazne vrijednosti proračuna za fazu sklapanja i ispitnu fazu pod punim opterećenjem.



Slika 12. Sile i krakovi djelovanja sila

Tablica 7. Dobivene vrijednosti prirubničkog spoja prilikom sklapanja

Sklapanje prirubničkog spoja ($I=0$):

$F_{B0,nom} = 96,612 \text{ kN}$	nominalna sila vijaka [prema jednadžbi (103)]
$F_{B0,max} = 107,179 \text{ kN}$	maksimalna sila vijaka [prema jednadžbi (104)]
$F_{B0,min} = 86,045 \text{ kN}$	minimalna sila vijaka [prema jednadžbi (105)]
$F_{G0,max} = 107,179 \text{ kN}$	maksimalna sila brtve [prema jednadžbi (106)]
$F_{G0,min} = 86,045 \text{ kN}$	minimalna sila brtve [prema jednadžbi (107)]
$M_{t,nom} = 75,551 \text{ Nm}$	nominalni moment momentnog ključa [prema jednadžbi (146)]
$\phi_{B0} = 0,761 \leq \phi_{max} = 0,927$	sigurnost vijka (sklapanje) [prema jednadžbi (148)]
$\phi_{G0} = 0,27 \leq \phi_{max} = 0,927$	sigurnost brtve (sklapanje) [prema jednadžbi (120)]

Tablica 8. Dobivene vrijednosti prirubničkog spoja u ispitnom stanju

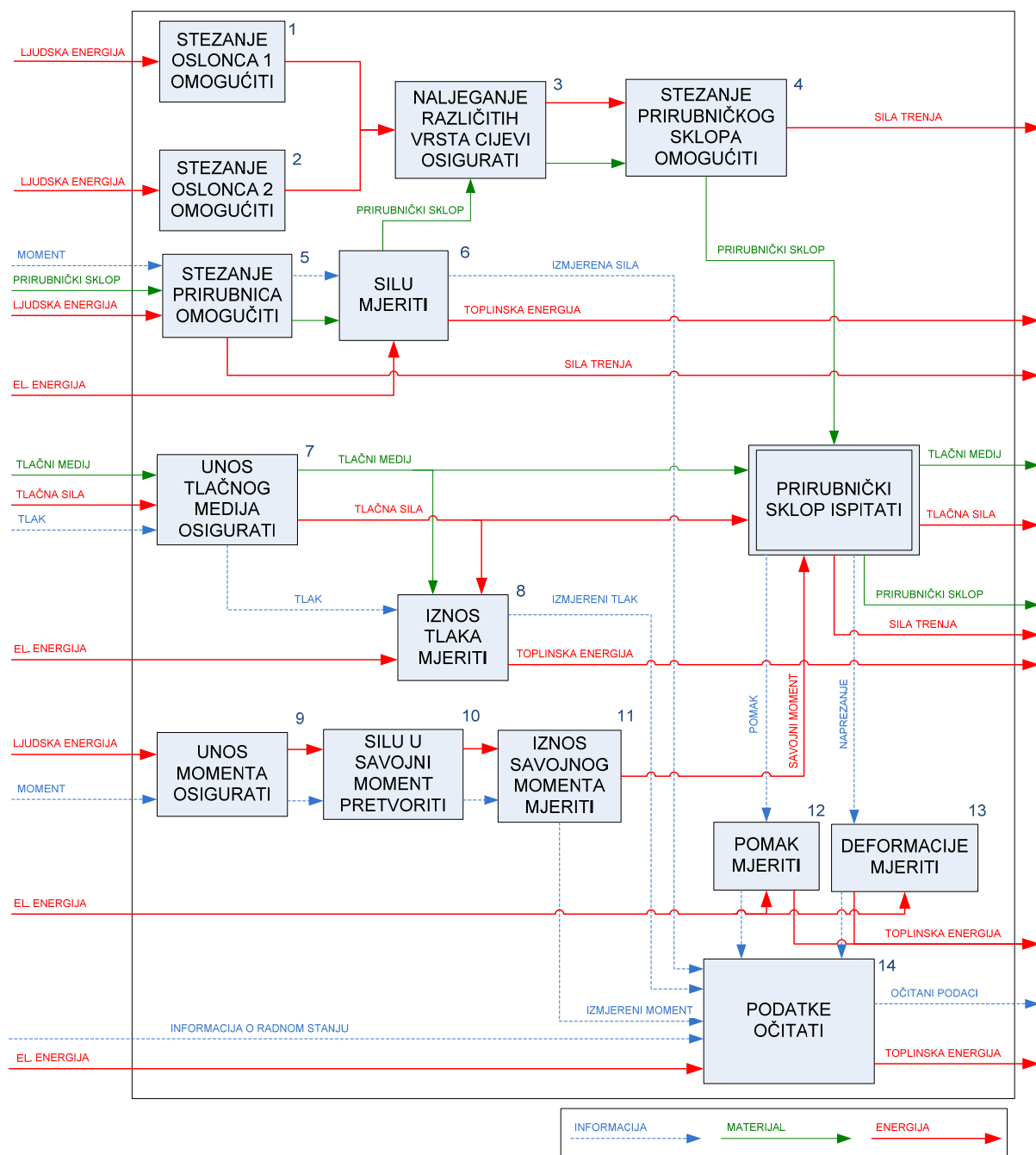
Testiranje prirubničkog spoja (I=1):

$F_{Bl,max} = 143,417 \text{ kN}$	maksimalna sila vijaka [prema jednadžbi (157)]
$F_{Bl,min} = 118,176 \text{ kN}$	minimalna sila vijaka [prema jednadžbi (156)]
$F_{Gl,max} = 75,598 \text{ kN}$	maksimalna sila brtve [prema jednadžbi (155)]
$F_{Gl,min} = 50,303 \text{ kN}$	minimalna sila brtve [prema jednadžbi (154)]
$F_{Qi} = 31,301 \text{ kN}$	sila tlaka [prema jednadžbi (77)]
$F_{Ri} = 36,571 \text{ kN}$	rezultantna vanjska sila [prema jednadžbi (78)]
$h_H = 25,532 \text{ mm}$	krak djelovanja resultantne sile [prema jednadžbi (73)]
$h_G = 13,938 \text{ mm}$	krak djelovanja sile brtvljenja [prema jednadžbi (72)]
$h_p = 12,536 \text{ mm}$	korekcijski faktor kraka djelovanja sile tlaka [prema jednadžbi (87)]
$\phi_{Bl} = 0,772 \leq \phi_{max} = 0,927$	sigurnost vijka [prema jednadžbi (149)]
$\phi_{Gl} = 0,103 \leq \phi_{max} = 0,927$	sigurnost brtve [prema jednadžbi (121)]
$\phi_{Fi} = 0,448 \leq \phi_{max} = 0,927$	sigurnost prirubnice [prema jednadžbi (127)]

5 FUNKCIJSKA STRUKTURA I MORFOLOŠKA MATRICA

5.1 Funkcijska struktura

Na slici 13. dana je funkcijska struktura uređaja prema kojoj će se temeljiti daljnja razrada koncepta.

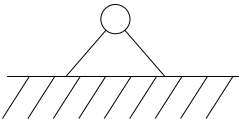
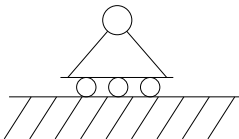
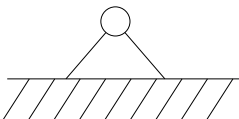
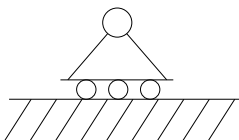
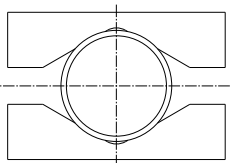
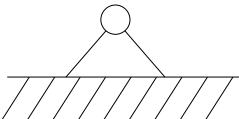
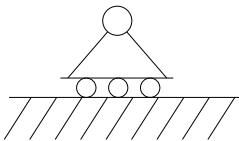
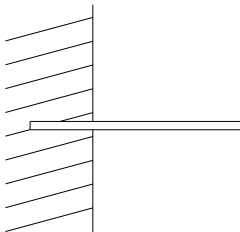





Slika 13. Funkcijska struktura

5.2 Morfološka matrica

U tablici 9. opisane su sve funkcije prema funkcijskoj strukturi s slike 13.

Tablica 9. Morfološka matrica

Br.	FUNKCIJA	RIJEŠENJE 1	RIJEŠENJE 2	RIJEŠENJE 3
1.	STEZANJE OSLONCA 1 OMOGUĆITI	čvrsti oslonac 	pomični oslonac 	
2.	STEZANJE OSLONCA 2 OMOGUĆITI	čvrsti oslonac 	pomični oslonac 	
3.	NALJEGANJE RAZLIČITIH VRSTA CIJEVI OSIGURATI	oblikom 	specifičnom glavom svake cijevi	
4.	STEZANJE PRIRUBNIČKOG SKLOPA OMOGUĆITI	čvrsti oslonac 	pomični oslonac 	ukliještenje 
5.	STEZANJE PRIRUBNICA OMOGUĆITI	ručno 	momentni ključ 	hidraulični uređaj 

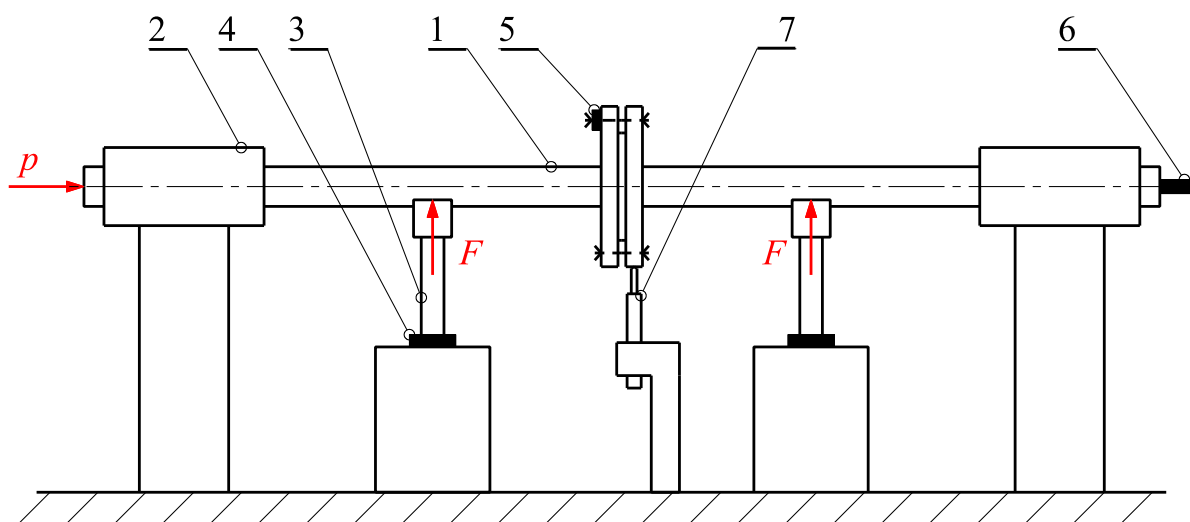
6.	SILU MJERITI	dinamometar 	pretvornici sile (eng. load cell)	
				
				
7.	UNOS TLAČNOG MEDIJA OSIGURATI	konektori 	regulacijski ventil (mehanički) 	regulacijski ventil (elektromagnetski) 
8.	IZNOS TLAKA MJERITI	opružni tlačni uređaj 	pretvornici tlaka	
				
9.	UNOS MOMENTA OSIGURATI	silom 	pužnim prijenosom 	zupčaničkim prijenosom 

10.	SILU U SAVOJNI MOMENT PRETVORITI	sila na kraku	spreg sila	mehanizam
11.	IZNOS SAVOJNOG MOMENTA MJERITI	pretvornici momenta		mjerjenjem sile
				
12.	POMAK MJERITI	pretvornici pomaka		
				
13.	DEFORMACIJE MJERITI	mehanički tenzometar	optički tenzometar	elektrootpornički tenzometar
				
14.	PODATKE OČITATI			

6 GENERIRANJE KONCEPATA I RJEŠENJA

6.1 Koncept 1

Uređaj se bazira na unosu sile na određenom kraku, unoseći tako savojni statički moment u prirubnički sustav. Prirubnički spoj je uklješten između dva oslonca (slika 14. – 2), koji ne dopuštaju pomak. Zbog samog uklještenja oslonci su velike duljine kako bi se što vjernije ostvarilo uklještenje sustava. Unos tlačnog medija se ostvaruje sa strane prirubničkog spoja preko konektora na koji se direktno spaja tlačni vod. Tlačne pumpe imaju na sebi očitavanje iznosa tlaka koji isporučuju, ali za preciznije i točnije vrijednosti predviđen je električni pretvornik tlaka na suprotnoj strani prirubničkog sustava (slika 14. – 6). Unos savojnog momenta u sustav je zamišljen unosom sile na određenom varijabilnom kraku preko vijčanog sustava (slika 14. – 4). U svrhu mjerenja sile koju unosimo u sustav predviđeni su električni pretvornici za mjerenje sile (slika 14. – 4).



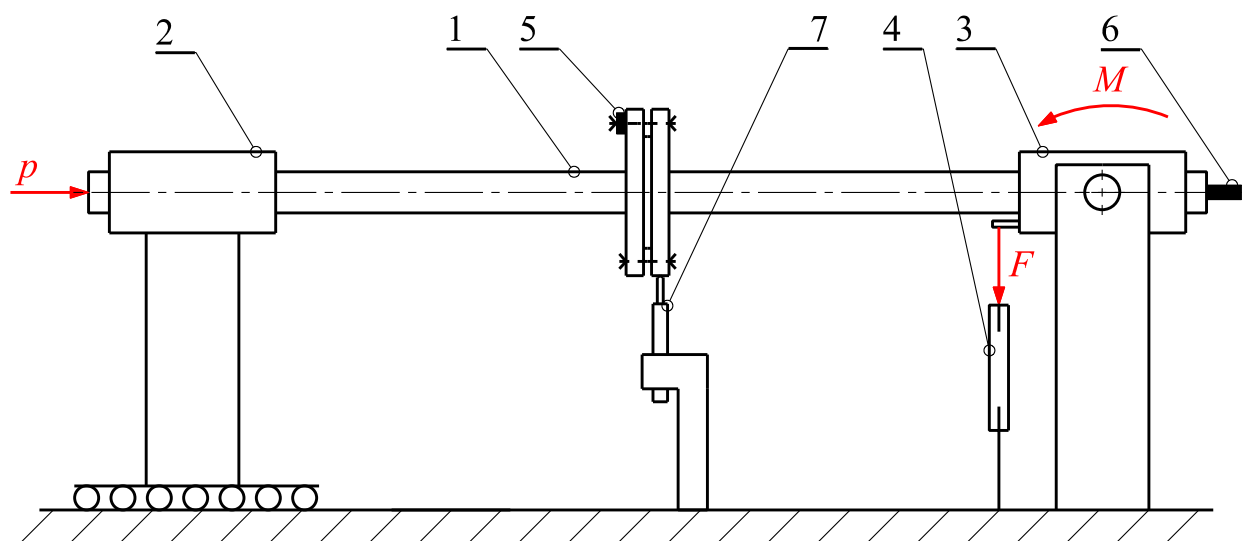
Slika 14. Koncept 1

(1 – prirubnički spoj, 2 – oslonac, 3 – uređaj za unos sile (vijčani), 4 – instrument za mjerenje sile, 5 – instrument za mjerenje sile, 6 – instrument za mjerenje tlaka i 7 – instrument za mjerenje pomaka)

6.2 Koncept 2

Ovaj uređaj je zamišljen na principu jednog slobodnog i jednog čvrstog oslonca. Slobodni oslonac (slika 15. – 2) dozvoljava pomak u aksijalnom smjeru, tj. cijeli se oslonac nalazi na pokretnom klizaču ili tračnicama, omogućavajući pomak cijelog prirubničkog spoja u aksijalnom smjeru. Drugi oslonac (slika 15. – 3) je čvrsti oslonac i služi za unos savojnog momenta u sustav. Sastoji se od okretnog dijela (slika 15. – 3), s ležajnim mjestom i statičkog, nosivog dijela (slika 15. – 3). Konstrukcija drugog oslonca omogućuje zakretanje prirubničkog spoja te je na taj način omogućen unos savojnog momenta u sustav. Savojni moment se unosi preko sile nateznog vijka (slika 15. – 4). Iznos sile (odnosno savojnog momenta) potrebno je mjeriti dinamometrom.

Unos tlačnog medija se ostvaruje na isti način kao i kod koncepta 1 (poglavlje 6.1), sa strane prirubničkog spoja preko konektora na koji se direktno spaja tlačni vod. Mjerenje unesenog tlaka omogućuje električni pretvornik tlaka na suprotnoj strani prirubničkog spoja (slika 15. – 6).



Slika 15. Koncept 2

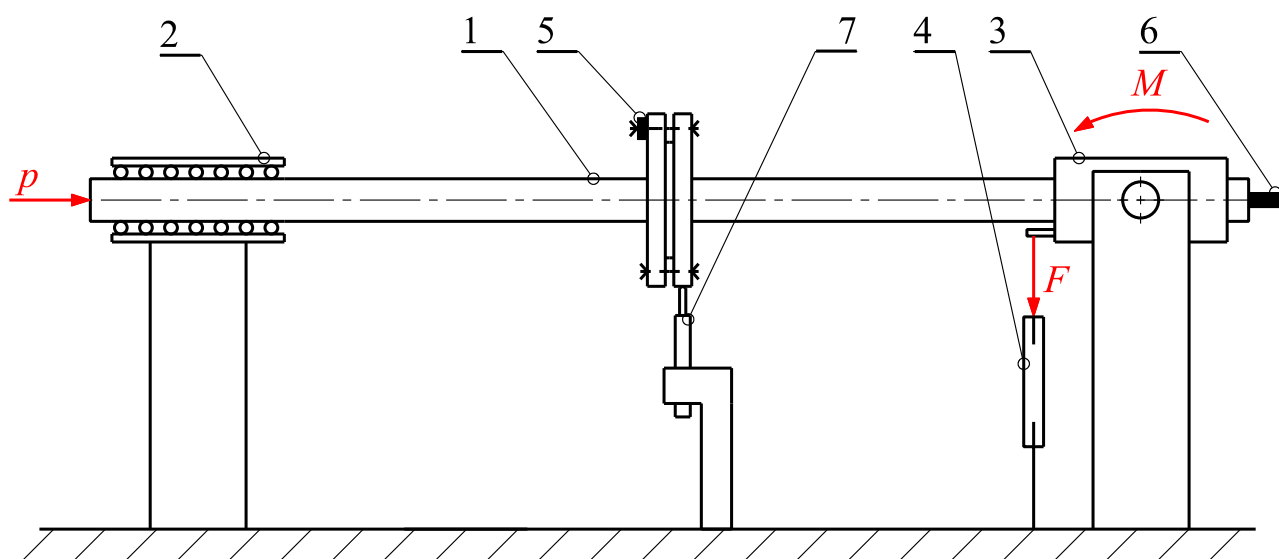
(1 – prirubnički spoj, 2 – oslonac (slobodni), 3 – oslonac (okretni), 4 – unos sile (natezni vijak), 5 – instrument za mjerenje sile, 6 – instrument za mjerenje tlaka i 7 – instrument za mjerenje pomaka)

6.3 Koncept 3

Uređaj se bazira na konceptu 2 (poglavlje 6.2) s drugačijom izvedbom slobodnog oslonca. Za razliku od koncepta 2, prirubnički spoj je uležišten unutar oslonca preko kliznog prstena ili kliznog elementa (slika 16. – 2). Na ovakav način se prirubničkom spoju omogućuje pomak u aksijalnom smjeru na jednostavniji način.

Unos savojnog momenta je izveden na isti način kao u konceptu 2, gdje se preko čvrstog okretnog oslonca i nateznog vijka unosi sila.

Također kao i u konceptu 2 unos tlaka se ostvaruje direktnim spajanjem tlačnog voda na sustav konektorom i mjerenjem tlaka električnim pretvornikom.



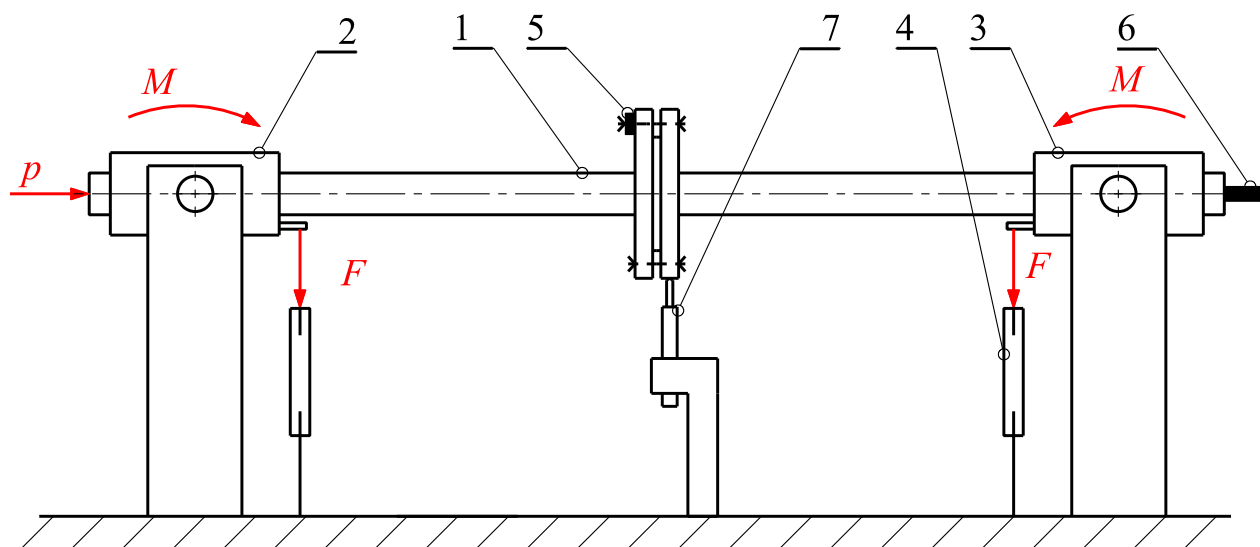
Slika 16. Koncept 3

(1 – prirubnički spoj, 2 – oslonac (slobodni), 3 – oslonac (okretni), 4 – unos sile (natezni vijak), 5 – instrument za mjerenje sile, 6 – instrument za mjerenje tlaka i 7 – instrument za mjerenje pomaka)

6.4 Koncept 4

Četvrti koncept se sastoji od dva čvrsta okretna oslonca (slika 17 – 2, 3) preko kojih se sa svake strane, preko sile nateznog vijka unosi moment na svakoj strani sustava. Sila nateznog vijka (odnosno uneseni moment) mjeri se pomoću dinamometra.

Unos tlačnog medija ostvaruje se na isti način kao i kod prijašnjih koncepata, sa strane prirubničkog spoja preko priključka koji se direktno spaja tlačni vod. Mjerenje unesenog tlaka omogućeno je električnim pretvornikom tlaka na suprotnoj strani prirubničkog spoja (slika 17. – 6).



Slika 17. Koncept 4

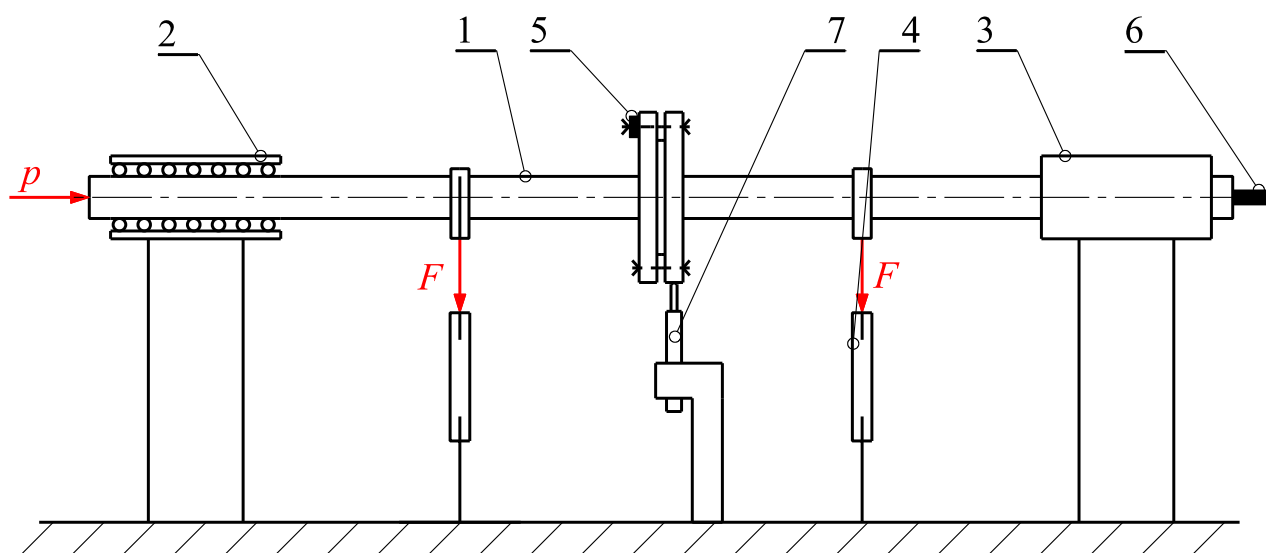
(1 – prirubnički spoj, 2 – oslonac (okretni), 3 – oslonac (okretni), 4 – unos sile (natezni vijak), 5 – instrument za mjerenje sile, 6 – instrument za mjerenje tlaka i 7 – instrument za mjerenje pomaka)

6.5 Koncept 5

Koncept 5 se sastoji od dva oslonca (slika 18. – 2), slobodnog i uklještenog. Unutar slobodnog oslonca se preko kliznog elementa uležišćuje prirubnički spoj. Drugi oslonac služi kako bi se prirubnički spoj uklještio (slika 18. – 3).

Unos savojnog momenta u ustav izveden je sa dva natezna vijka kojima se unosi sila na određenom kraku. Mjerenje sile nateznih vijaka izvedeno je elektrootporničkim tenzometrom.

Unos tlačnog medija ostvaren je spajanjem tlačnog voda preko priključka direktno na sustav te se pomoću električnog pretvornika tlaka ostvaruje mjerenje tlaka medija.



Slika 18. Koncept 5

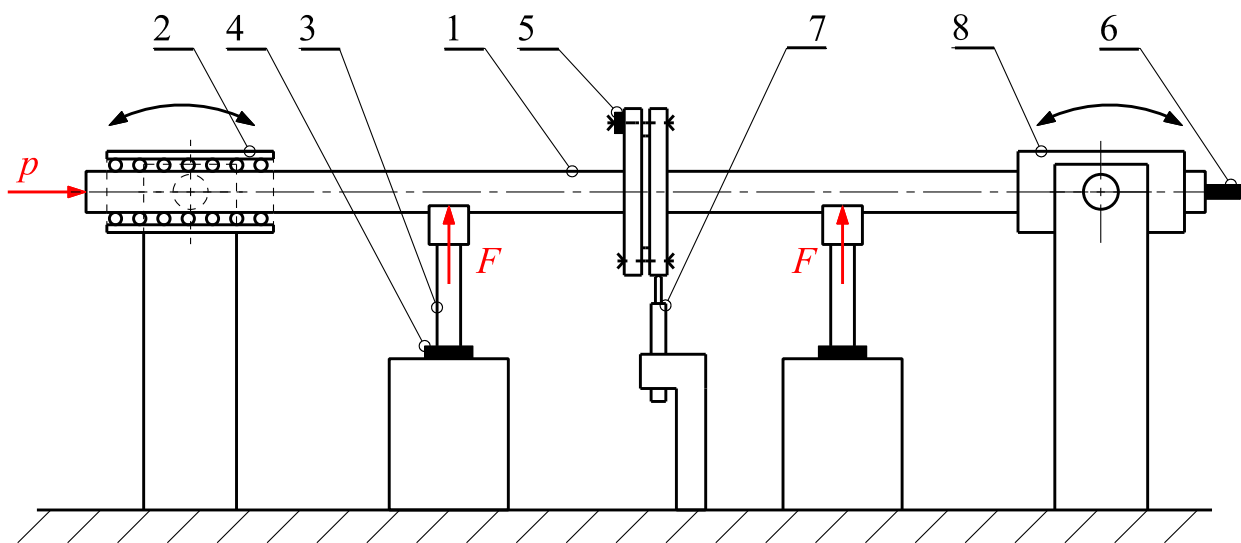
(1 – prirubnički spoj, 2 – oslonac (slobodni), 3 – oslonac (uklještenje), 4 – unos sile (natezni vijak), 5 – instrument za mjerenje sile, 6 – instrument za mjerenje tlaka i 7 – instrument za mjerenje pomaka)

6.6 Koncept 6

Uređaj je zamišljen na principu jednog slobodnog i jednog čvrstog oslonca. Slobodni oslonac (slika 19. – 2) dozvoljava pomak u aksijalnom smjeru, tj. cijeli oslonac je konstrukcijski riješen tako da omogućuje rotiranje prirubničkog spoja oko centra oslonca i isto tako omogućuje uležištenje prirubničkog spoja preko kliznih elemenata. Drugi oslonac (slika 19. – 8) je čvrsti oslonac te se sastoji od okretnog dijela s ležajnim mjestom i čvrstog, nosivog dijela.

Unos savojnog momenta ostvaruje se pomoću dva vijčana uređaja za unos sile (slika 19. – 3), preko kojih se unosom sile na određenom kraku ostvaruje zadani savojni moment u prirubničkom spoju. Mjerenje unesene sile (odnosno savojnog momenta) ostvaruje se upotrebom električnih pretvornika (slika 19. – 4).

Unos tlačnog medija ostvaruje se sa strane prirubničkog spoja preko priključka na koji se direktno spaja tlačni vod te mjerenja iznosa tlaka električnim pretvornikom na suprotnoj strani prirubničkog spoja (slika 19. – 6).



Slika 19. Koncept 6

(1 – prirubnički spoj, 2 – oslonac (slobodni), 3 – uređaj za unos sile (vijčani), 4 – instrument za mjerenje sile, 5 – instrument za mjerenje sile, 6 – instrument za mjerenje tlaka, 7 – instrument za mjerenje pomaka i 8 – oslonac (čvrsti))

6.7 Zaključak i odabir rješenja za daljnju razradu

Generirano je zaključno šest koncepata i različitih konstrukcijskih izvedbi uređaja. Nabrojat ćemo neke od glavnih problema određenih koncepata, tj. razloge zašto određeni koncepti nisu izabrani za daljnju razradu.

Glavni problem prvog koncepta čini uklještenje cijelog prirubničkog spoja osloncima. Iako vrlo jednostavno konstrukcijsko rješenje, problem je u reakcijskim momentima oslonaca te statički neodređenoj konstrukciji. Drugi i treći koncept čine konstrukcijske izvedbe temeljene na istom principu, stoga dijele iste probleme. Problem koncepata čini unos momenta preko okretnog oslonca. Ovakvim načinom uz savojni moment unosimo i poprečnu silu u cijeli prirubnički spoj, što je glavni nedostatak ovih koncepata. Problem četvrtog koncepta je nedostatak prostora za natezne vijke. Peti koncept je problematičan zbog uklještenog oslonca, tj. uz unos momenta u prirubnički spoj unosimo moment u uklještenu oslonac.

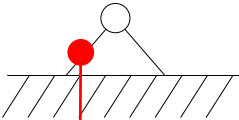
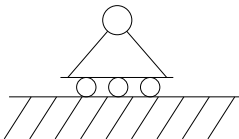
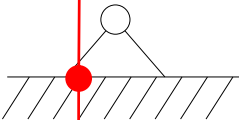
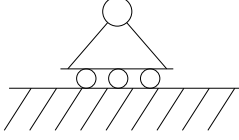
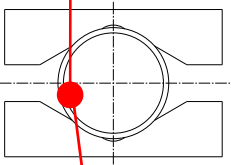
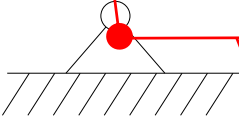
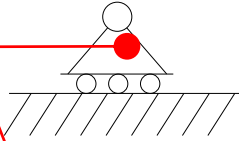
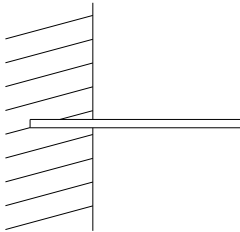



Najrealniji koncept sa mehaničkog gledišta je koncept broj šest. Unos sile je prilično jednostavno i ekonomski isplativo. Nadalje, ne unosimo dodatne poprečne sile u ispitivani prirubnički spoj što je velika prednost jer je ispitivani prirubnički spoj opterećen samo savojnim momentom, što je i zadatak ispitivanja.



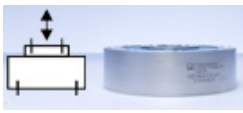







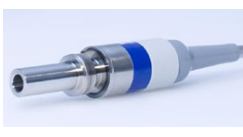
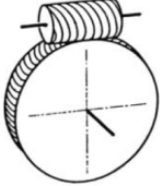
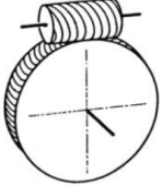
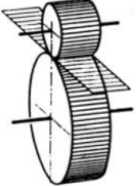
Nakon detaljne analize prednosti i nedostataka možemo reći da je za daljnju razradu odabran šesti koncept. Zaključno možemo reći da će se sljedeće točke fokusirati na detaljnoj analizi i razradi izabranog šestog koncepta. Potrebno je provesti proračun kritičnih dijelova konstrukcije kako bi se kontrolirala njihova sigurnost. Također je bitno naglasiti da će konstrukcija biti predimenzionirana za zadani zadatak s ciljem ispitivanja većih prirubničkih spojeva u budućnosti.


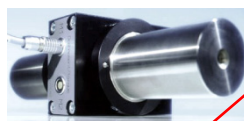
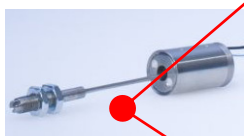
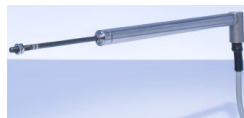
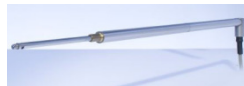

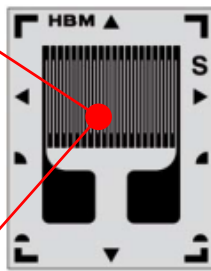


6.8 Morfološka matrica odabranog rješenja

U tablici 10. možemo vidjeti odabrana rješenja korištena za daljnju razradu.

Tablica 10. Morfološka matrica odabranog rješenja (koncept 6)

Br.	FUNKCIJA	RIJEŠENJE 1	RIJEŠENJE 2	RIJEŠENJE 3
1.	STEZANJE OSLONCA 1 OMOGUĆITI	čvrsti oslonac 	pomični oslonac 	
2.	STEZANJE OSLONCA 2 OMOGUĆITI	čvrsti oslonac 	pomični oslonac 	
3.	NALJEGANJE RAZLIČITIH VRSTA CIJEVI OSIGURATI	oblikom 	specifičnom glavom svake cijevi	
4.	STEZANJE PRIRUBNIČKOG SKLOPA OMOGUĆITI	čvrsti oslonac 	pomični oslonac 	ukliještenje 
5.	STEZANJE PRIRUBNICA OMOGUĆITI	ručno 	momentni ključ 	hidraulični uređaj 

6.	SILU MJERITI	dinamometar 	pretvornici sile (eng. load cell)	
				
				
7.	UNOS TLAČNOG MEDIJA OSIGURATI	konektori 	regulacijski ventil (mehanički) 	regulacijski ventil (elektromagnetski) 
8.	IZNOS TLAKA MJERITI	opružni tlačni uređaj 	pretvornici tlaka	
				
9.	UNOS MOMENTA OSIGURATI	silom 	pužnim prijenosom 	zupčaničkim prijenosom 

10.	SILU U SAVOJNI MOMENT PRETVORITI	sila na kraku	spreg sila	mehanizam
11.	IZNOS SAVOJNOG MOMENTA MJERITI	pretvornici momenta		mjerjenjem sile
				
12.	POMAK MJERITI	pretvornici pomaka		
				
13.	DEFORMACIJE MJERITI	mehanički tenzometar	optički tenzometar	elektrooptički tenzometar
				
14.	PODATKE OČITATI			

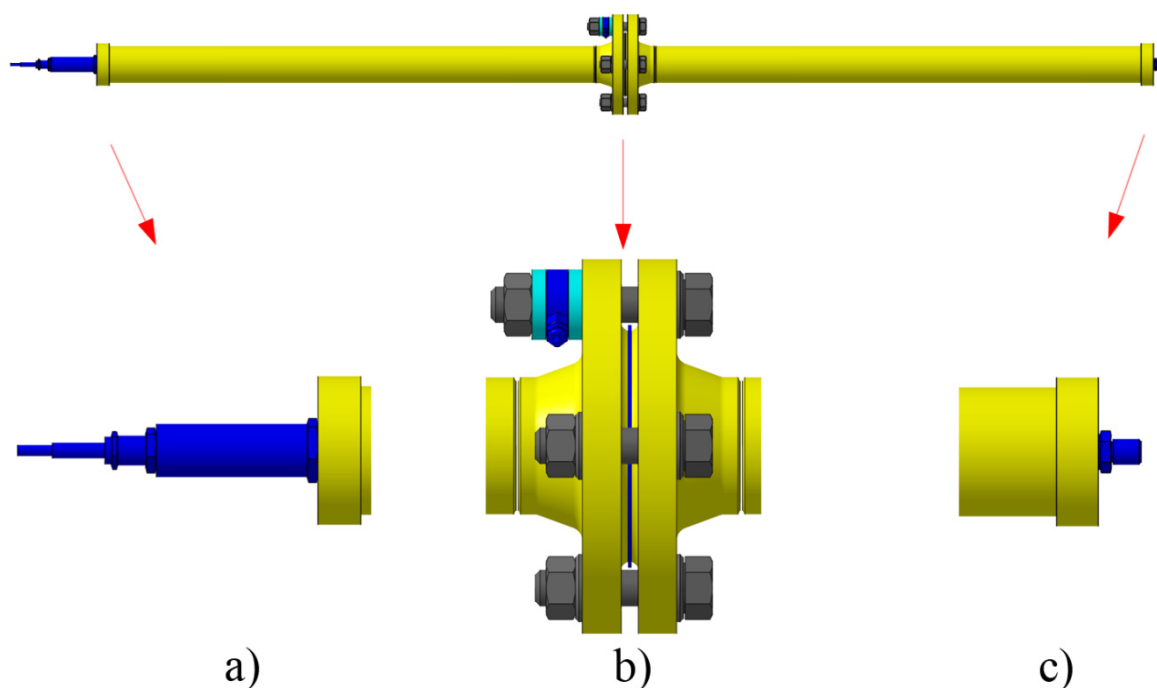
7 ANALIZA ODABRANOG KONCEPTA

7.1 Prirubnički spoj

Zadani prirubnički spoj sastoji se od prirubnica grla DN50 PN40, s 4 vijka, M16, te se njihovo sklapanje ostvaruje momentnim ključem u više faza do konačnog izračunatog nominalnog momenta od 75,551 Nm [prema jednadžbi (146)]. Idealno rješenje bi bilo korištenje hidrauličnog uređaja za pritezanje prirubničkog spoja, ali zbog ekonomskih razloga i nedostupnosti samog uređaja koristimo momentni ključ koji kao što je napomenuto u radu daje velika rasipanja. U svrhu mjerenja i kontrole sile vijaka prirubničkog spoja koristimo električni pretvornik sile.

Unos tlačnog medija ostvaruje se pomoću tlačne pumpe, spojene direktno na prirubnički spoj pomoću priključka. Mjerenje i kontrola ispitnog tlaka se ostvaruje očitanjem iznosa s električnog pretvornika tlaka, spojenog na suprotni kraj prirubničkog spoja.

Slika 20. prikazuje ispitni prirubnički spoj s njegovim specifičnim dijelovima.



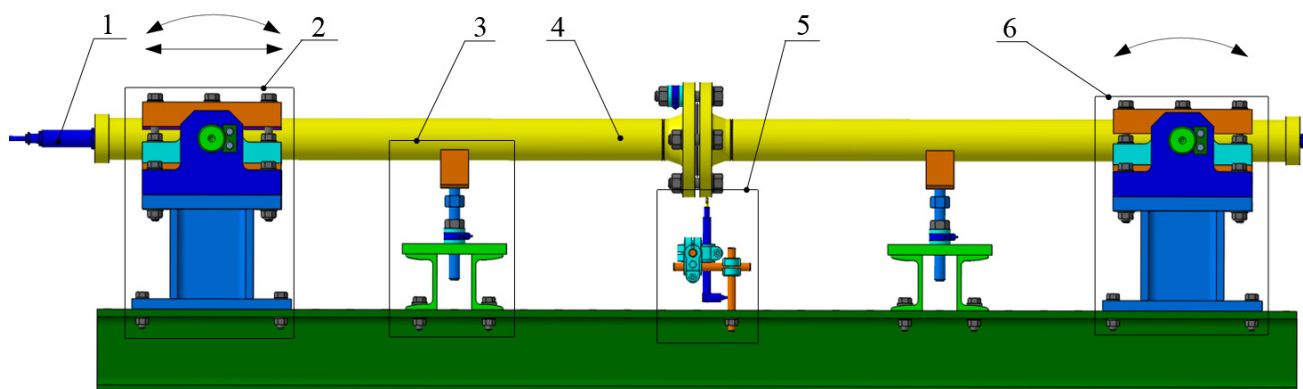
Slika 20. Prirubnički spoj

(a) – mjerni instrument za mjerenje tlaka (HBM – P3), b) – prirubnički spoj i c) – priključak tlačnog voda)

7.2 Uređaj za ispitivanje prirubničkog spoja

Odabrano rješenje za razradu i analizu je koncept 6 (poglavlje 6.6). Uređaj se temelji na unosu sile na određenom kraku (dva uređaja za unos sile - Slika 21. - 3), odnosno unosu savojnog momenta u prirubnički spoj. Prednost ovog uređaja naspram ostalih koncepata je u jednom slobodnom i jednom čvrstom osloncu, te unosu samo savojnog momenta u prirubnički spoj bez dodatne poprečne sile.

Oslonci su konstrukcijski riješeni na način da omogućuju rotaciju oko osovine ostvarujući na ovakav način čvrsti oslonac. Nadalje, u prvom osloncu je uz rotaciju, također omogućena translacija prirubničkog spoja u aksijalnom smjeru omogućujući približavanje slobodnom mehaničkom osloncu.

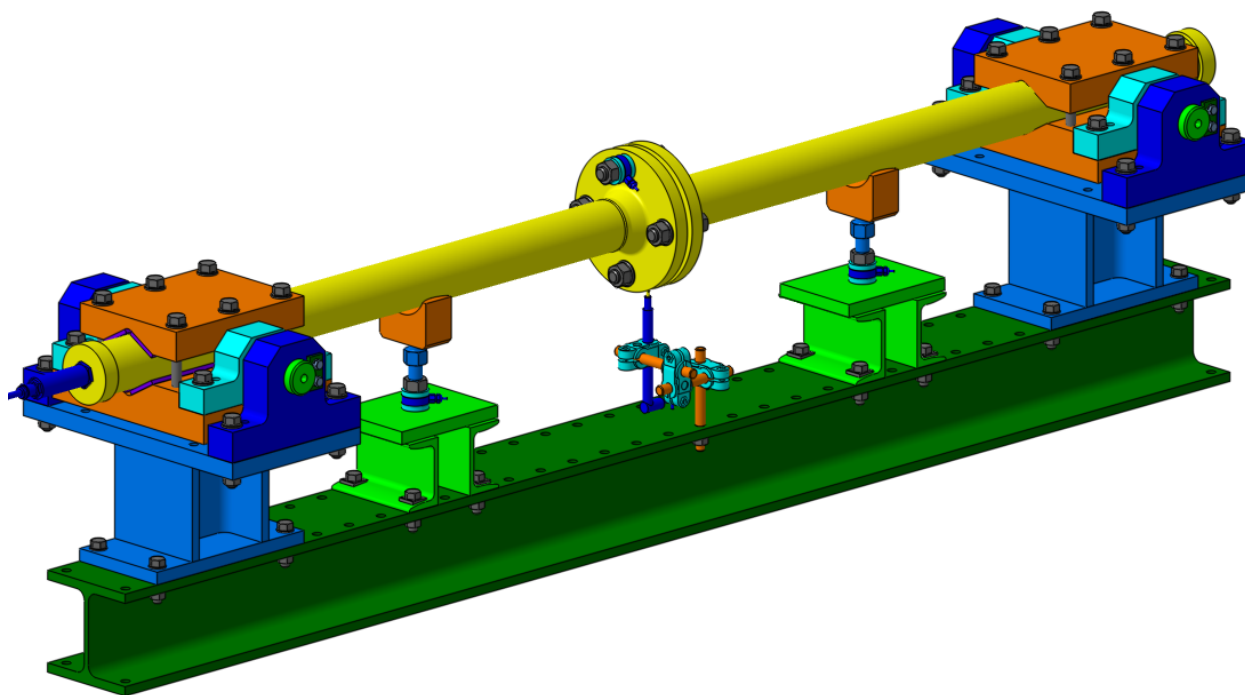


Slika 21. Odabrani razrađeni koncept

(1 – mjerni instrument za mjerenje tlaka, 2 – slobodni oslonac, 3 – uređaj za unos sile, 4 – prirubnički spoj, 5 – sklop za mjerenje pomaka prirubničkog spoja, 6 – čvrsti oslonac)

Radi moguće upotrebe i izrade konstrukcijskog rješenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje jedan od dodatnih ciljeva razrade koncepta je razraditi konstrukcijsku varijantu uređaja na što jednostavniji i ekonomski prihvatljiviji način. Stoga, sam uređaj se sastoji od standardnih profila.

Na slici 22. možemo vidjeti prostorni pogled razrađenog rješenja s sklopljenim prirubničkom spojem.



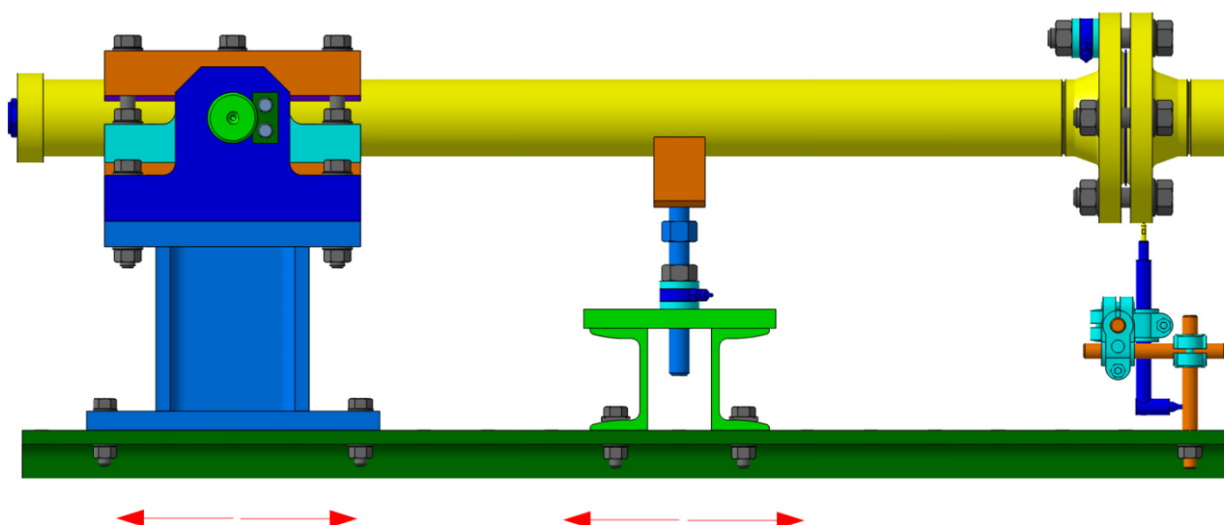
Slika 22. Prostorni pogled odabranog koncepta

7.2.1 Varijabilnost uređaja

Konstruktivsko rješenje treba biti primjenjivo na što više prirubničkih spojeva te se samim elementima konstrukcije treba omogućiti pomicanje u aksijalnom smjeru. Cilj ovih zahtjeva je upotreba uređaja u što više slučajeva, kao i što veća varijabilnost mogućih eksperimenata.

Ovakvim početnim ciljevima proizlaze dva bitna konstrukcijska zahtjeva, zahtjev za aksijalnim pomicanjem elemenata i želja za upotrebom više različitih prirubničkih cijevi, a ne samo zadani prirubnički spoj.

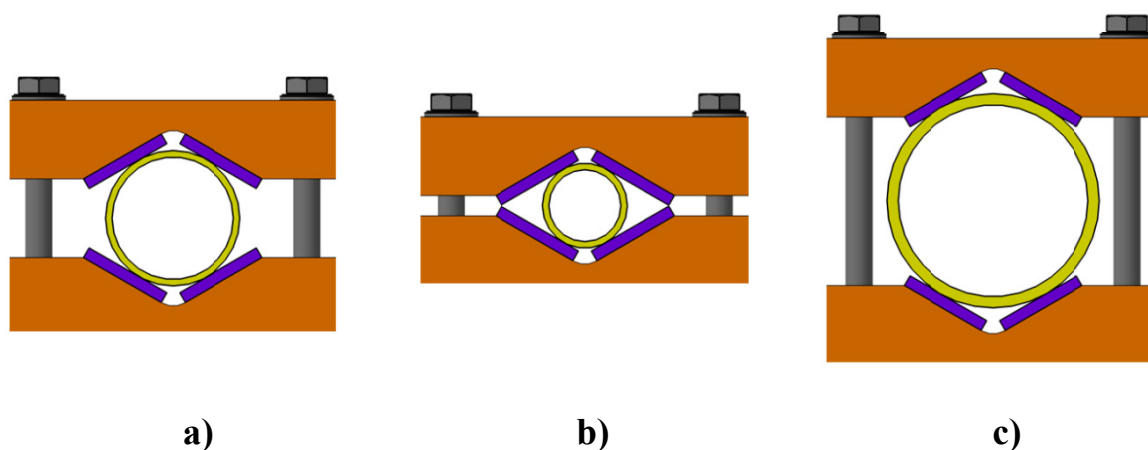
Zahtjev za varijabilnim pomicanjem oslonaca i uređaja za unos sile riješen je pomoću standardnog I-profila (Slika 23. – tamno zelena boja), na kojemu su bušeni provrti u razmacima od 50 mm. Na ovakav način moguće je mijenjati određene parametre sustava vezane uz unos sile i pozicije oslonaca i u konačnici mijenjati sam eksperiment.



Slika 23. Aksijalna varijabilnost konstrukcijskih elemenata

Druga mogućnost uređaja je upotreba više različitih prirubničkih cijevi i samim time upotreba uređaja na više različitih eksperimenata.

Razrada uređaja temeljila se na zadanom prirubničkom spoju s prirubnicom grla DN50 PN40 i cijevi vanjskog promjera 60,3 mm. Oblikom konstrukcije (V-oblik) postiže se tražena varijabilnost, ali isto tako i bolja raspodjela rezultantne sile oslonca.



Slika 24. Varijabilnost prirubničkih spojeva

(a – zadana cijev – vanjski promjer = 60,3 mm, b – minimalni vanjski promjer cijevi ≈ 38 mm i c – maksimalni vanjski promjer cijevi ≈ 95 mm)

Slika 24. prikazuje tri varijante prirubničkih cijevi ostvarive uređajem. Slika 24. - a prikazuje definiranu prirubničku cijev vanjskog promjera 60,3 mm i zračnosti između steznih čeljusti od 20 mm. Slika 24 - b prikazuje graničnu minimalnu vrijednost s cijevi mogućeg vanjskog promjera od 38 mm i zračnosti između čeljusti od 9 mm. Slika 24. - c prikazuje

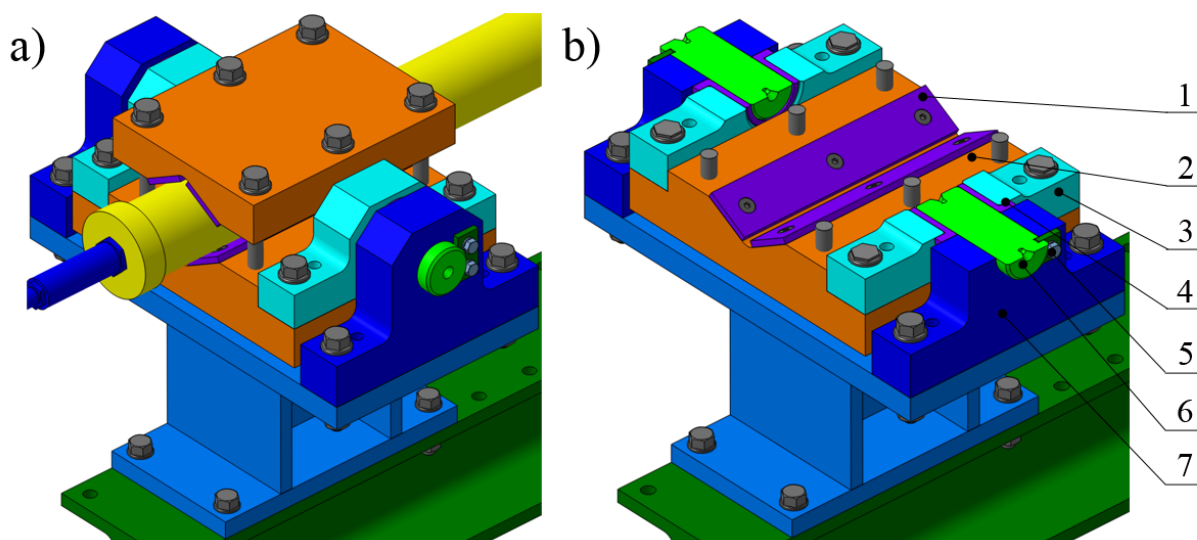
graničnu maksimalnu vrijednost s cijevi mogućeg vanjskog promjera od 95 mm i zračnosti između čeljusti od 75 mm.

7.2.2 Oslonci

Razrađeni uređaj bazira se na dva oslonca te je bilo potrebno konstrukcijski riješiti varijantu slobodnog i varijantu čvrstog oslonca. Slobodni oslonac mora omogućiti rotaciju oko središta oslonca kao i translaciju cijelog prirubničkog spoja u aksijalnom smjeru. Oslonac se sastoji od dvije čeljusti na koje se priteže prirubnički spoj (Slika 25. – 2). Translacija aksijalnom smjeru ostvaruje se upotrebom kliznih pločica na samim čeljustima konstrukcije (Slika 25. – 1).

Da bi se ostvario čvrsti, odnosno slobodni oslonac te izbjeglo uklještenje, cijelom prirubničkom spoju, treba se omogućiti rotacija oko središta oslonca. Rotiranje cijelog oslonca je konstrukcijski riješeno s dvije osovine uležištene unutar kliznih prstena, ostvarujući mogućnost rotiranja oko središta oslonca.

Na slici 25. možemo vidjeti detaljniji prikaz presjeka konstrukcijskog rješenja slobodnog oslonca s osnovnim dijelovima potrebnim za rotaciju i aksijalni pomak. Također cijeli se oslonac veže za zavareni nosač radi potrebne visine cijelog uređaja, zbog uređaja za unos sile, kao i mjerne instrumente koji se vežu na noseći I-profil.



Slika 25. Slobodni oslonac

(a) oslonac s prirubničkim spojem; b) presjek oslonca (1 – klizna pločica, 2 – nosač cijevi, 3 – nosač kliznog prstena, 4 – klizni prsten, 5 – pločica protiv rotacije osovine, 6 – osovina i 7 – nosač osovine)

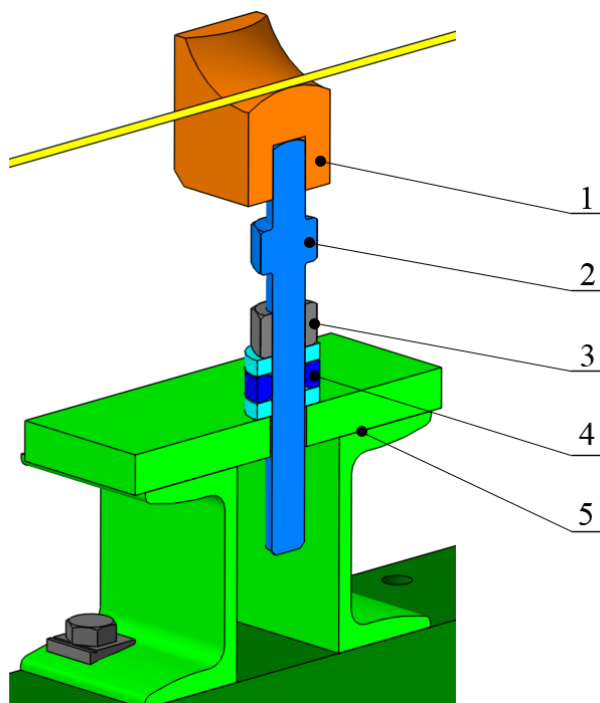
Drugi oslonac bazira se na prvom osloncu, ali cijevi s priрубničkim spojem nije dozvoljena translacija u aksijalnom smjeru, tj. drugi oslonac nema klizne pločice, već se sastoji samo od rotacijskog konstrukcijskog rješenja.

7.2.3 Uređaj za unos momenta

Unos momenta u priрубnički sustav izveden je pomoću zasebnog vijčanog sklopa pomoću kojeg unosimo silu. Kontakt između cijevi i vijčanog sklopa ostvaruje se pomoću konstrukcijskog elementa u obliku sedla po linijskom dodiru elemenata. Uređaj je rasklopiv i jednino je oslonac za vijčani spoj (Slika 26. - 5) čvrsto vezan za noseći I-profil.

Za mjerenje sile koju unosimo u sustav predviđen je električni pretvornik za mjerenje sile (KMR 200 kN – HBM [9]).

Problem ovog uređaja je u tome što je kontaktno sedlo predviđeno za cijev vanjskog promjera 60,3mm i u slučaju ispitivanja drugih promjera cijevi mora se izraditi novo sedlo specifično za ispitnu cijev.



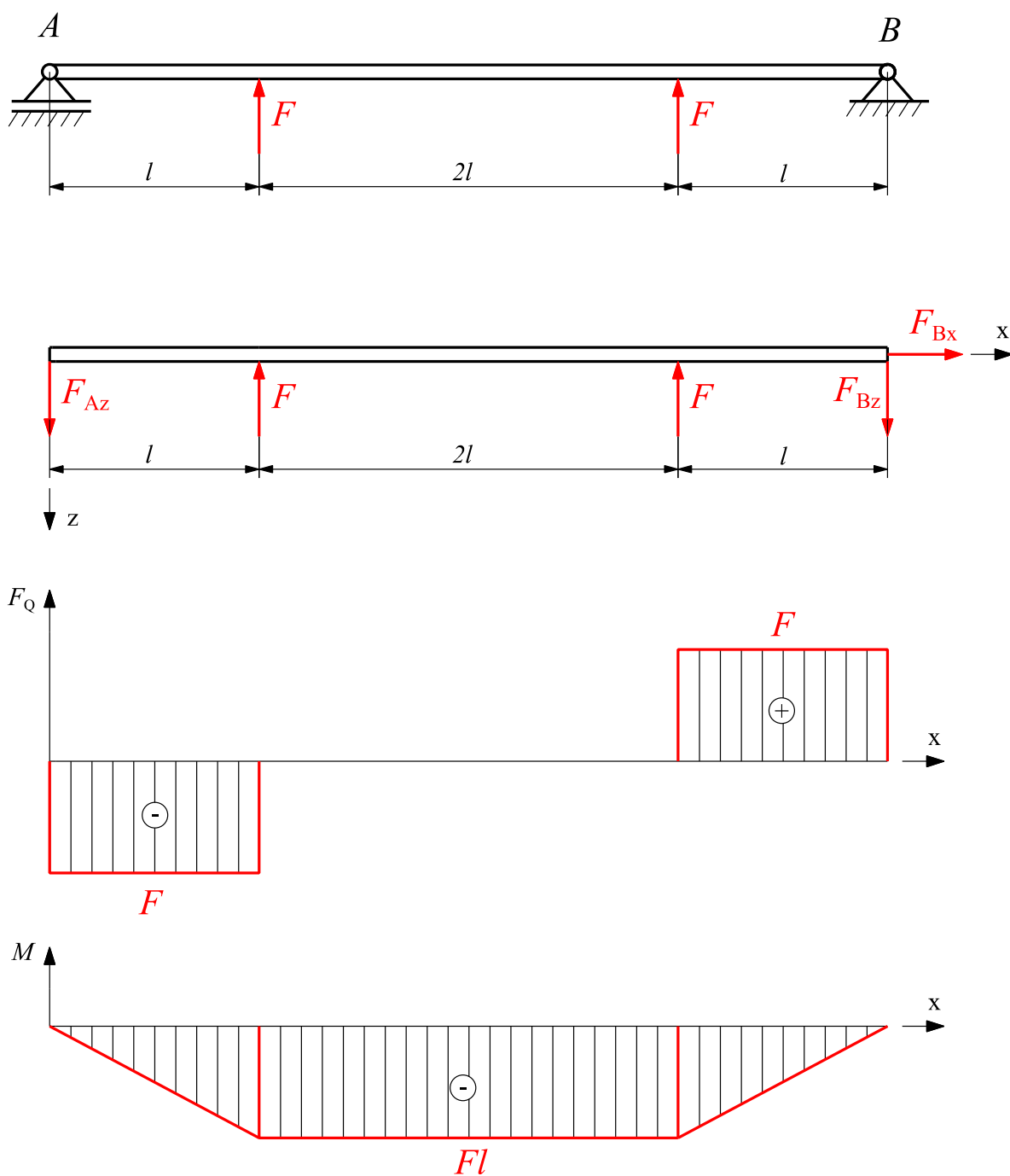
Slika 26. Presjek vijčanog uređaja za unos sile

(1 – sedlo, 2 – vijak za unos sile, 3 – matica M16, 4 – ispitni instrument za mjerenje sile i
5 – oslonac za vijčani spoj)

7.2.4 Proračun uz rješenje

7.2.4.1 Potrebna sila vijčanog spoja i reakcije u osloncima

Na slici 27. možemo vidjeti mehanički model prethodno opisanog uređaja na kojemu se temelji daljnji proračun.



Slika 27. Skica opterećenja, dijagram poprečnih sila, dijagram momenta savijanja

Zadani traženi maksimalni moment, M_{pot} iznosi 1000 Nm. Udaljenost između centra oslonca i vijčanog spoja za unos sile, $l = 350$ mm prema vrijednostima dobivenim konstrukcijom.

Prema mehaničkom modelu izraz za savojni moment, M_{pot} iznos momenta glasi

$$M_{\text{pot}} = Fl . \quad (159)$$

Sređivanjem i računanjem jednadžbe (159) dobivamo vrijednost potrebne sile u vijčanom spoju prema izrazu

$$F = F_{\text{pot}} = \frac{M_{\text{pot}}}{l} = \frac{1000}{0,35} = 2857 \text{ N} . \quad (160)$$

Jednadžbe ravnoteže nosača glase

$$\sum F_x = 0 , \quad (161)$$

$$\sum F_z = 0 , \quad (162)$$

$$\sum M_A = 0 , \quad (163)$$

iz čega slijedi

$$\sum F_x = F_{Bx} = 0 , \quad (164)$$

$$\sum F_z = 2F - F_{Az} - F_{Bz} = 0 , \quad (165)$$

$$\sum M_A = Fl + 3Fl - 4F_{Bz}l = 0 . \quad (166)$$

Rješavanjem jednadžbi (164), (165) i (166) i uvrštavanjem vrijednosti sile F_{pot} dobivamo reakcije u osloncima A i B

$$F_{Bx} = 0 , \quad (167)$$

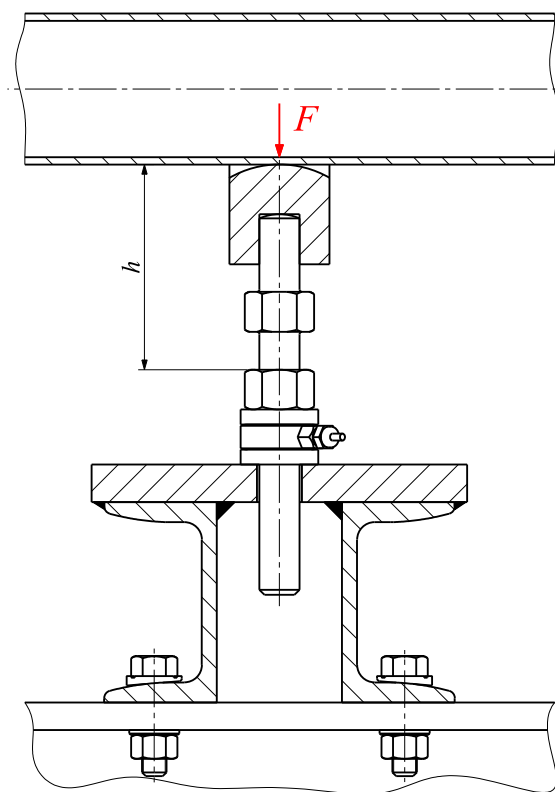
$$F_{Az} = F = 2857 \text{ N} , \quad (168)$$

$$F_{Bz} = F = 2857 \text{ N} . \quad (169)$$

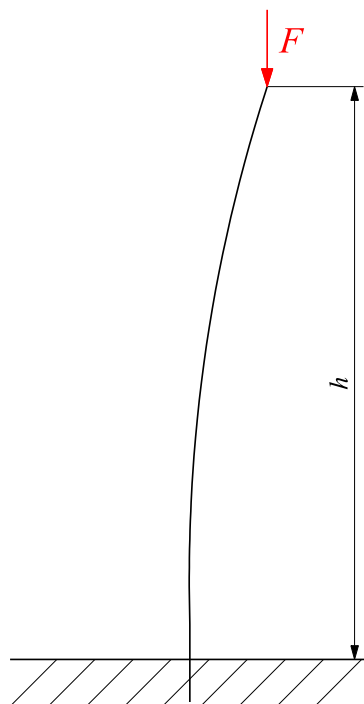
7.2.4.2 Izvijanje vijčanog spoja

Vijak za unos sile u prirubnički spoj sastoji se od šesterokutne šipke materijala 11SMn30 na koju je urezan navoj M16. Na slici 28. prikazan je razrađeni vijčani spoj s oznakama

potrebnim za proračun izvijanja vijčanog spoja. Tablica 11. prikazuje vrijednosti potisnog vijka M16. Proračun na izvijanje će biti proveden prema modelu sa slike 29. prema [14].



Slika 28. Vijčani spoj



Slika 29. Slučaj opterećenja na izvijanje za vijčani spoj prema [14]

Tablica 11. Vrijednosti vijka M16, materijala 11SMn30

d_{B0}	p_t	d_{B2}	d_{B3}	R_B	A_{Bk}	σ_{BM}	σ_{BT}	E_B
mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	MPa	MPa	GPa
16	2	14,701	13,546	0,289	144	1158	1034	210

Kritična sila izvijanja prema [14] dana je izrazom

$$F_k = \pi^2 \cdot \frac{E_B \cdot I_{\min}}{l_0^2} = \pi^2 \cdot \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 1,653 \cdot 10^{-9}}{0,164^2} = 127,364 \text{ kN} , \quad (170)$$

gdje je E_B modul elastičnosti materijala vijka, I_{\min} minimalni aksijalni moment tromosti prema izrazu

$$F_k = \frac{d_{B3}^4 \cdot \pi}{64} = \frac{13,546^4 \cdot \pi}{64} = 1,653 \cdot 10^3 \text{ mm}^4 , \quad (171)$$

a l_0 slobodna duljina izvijanja prema [14] dana izrazom

$$l_0 = 2 \cdot h = 2 \cdot 82 = 164 \text{ mm} . \quad (172)$$

Dopuštena sila kojom se može opteretiti vijak prema [14] dana je izrazom

$$F_{l,dop} = \frac{F_k}{v_l} = \frac{127,364}{5} = 25,473 \text{ kN} , \quad (173)$$

gdje je F_k kritična sila izvijanja a v_l faktor sigurnosti izvijanja koji prema [14] za čelik iznosi 5.

Kako je vidljivo prema jednadžbama (160) i (171) potrebna sila za zadani moment je manja od dopuštene sile izvijanja te možemo reći da neće doći do izvijanja.

Maksimalni savojni moment ostvariv dopuštenom silom izvijanja iznosi

$$M_{l,max} = F_{l,dop} \cdot l = 25,473 \cdot 0,350 = 8,915 \text{ kNm} . \quad (174)$$

Potrebno je kontrolirati sigurnost vijčanog spoja s maksimalno ostvarim naprežanjem prema [15], dano izrazom

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{l,dop}}{A_s} = \frac{25473}{156,66} = 162,593 \text{ MPa} , \quad (175)$$

gdje je $F_{I,dop}$ dopuštena sila izvijanja a A_S površina presjeka vijka preko kojeg se prenosi naprezanje prema izrazu

$$A_S = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d_{B2} + d_{B3}}{2} \right)^2 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{14,701 + 13,546}{2} \right)^2 = 156,66 \text{ mm}^2 . \quad (176)$$

Dopušteno naprezanje vijka prema [15] iznosi

$$\sigma_{dop} = 0,8 \cdot \sigma_{BT} = 0,8 \cdot 1034 = 827,2 \text{ MPa} . \quad (177)$$

Možemo vidjeti da je maksimalno naprezanje prema jednadžbi (175) manje od dopuštenog naprezanja vijka te možemo zaključiti da se vijak može opteretiti dopuštenom silom izvijanja i ostvariti maksimalni dopušteni moment prirubničkog spoja od 8,915 kNm.

7.2.4.3 Maksimalno ostvarivi moment prema dopuštenom naprezanju cijevi

Prirubnička cijev izrađena je od materijala X2CrNi19-11, statičke čvrstoće, R_C od 460 MPa, vanjskog promjera od 60,3 mm, unutarnjeg promjera 54,5 mm.

Za faktor sigurnosti uzimamo 1,5 i dopušteno naprezanje cijevi iznosi

$$\sigma_{dop,C} = \frac{R_C}{1,5} = \frac{460}{1,5} = 306,66 \text{ MPa} . \quad (178)$$

Naprezanje na savijanje prema [14] iznosi

$$\sigma_f = \frac{M_{f,max}}{W_C} \leq \sigma_{dop} , \quad (179)$$

gdje je $M_{f,max}$ maksimalni moment savijanja a W_C aksijalni moment otpora cijevi prema [14] dan izrazom

$$W_C = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d^4 - D^4}{d} = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{60,3^4 - 54,5^4}{60,3} = 7,162 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 , \quad (180)$$

u kojemu je d , vanjski promjer cijevi a D , unutarnji promjer cijevi.

Sređivanjem jednadžbe (179) dobivamo

$$M_{f,max} \leq \sigma_{dop} \cdot W_C = 3,066 \cdot 10^8 \cdot 7,162 \cdot 10^{-6} = 2,196 \text{ kNm} , \quad (181)$$

što bi značilo da vijčani spoj može davati maksimalnu silu koja iznosi

$$F_{max} = \frac{M_{f,max}}{l} = \frac{2,196}{0,350} = 6,275 \text{ kN} . \quad (182)$$

7.2.4.4 Kontrola sigurnosti vijaka oslonaca

Oslonci se sastoje od 6 M12 vijaka kvalitete 8.8. U tablici 12. možemo vidjeti vrijednosti odabranih vijaka.

Tablica 12. Vrijednosti vijka M12, kvalitete 8.8

d_{B0}	p_t	d_{B2}	d_{B3}	R_B	A_{Bk}	σ_{BM}	σ_{BT}	E_B
mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	MPa	MPa	GPa
12	1,75	10,863	9,853	0,253	76,3	800	640	210

Vijci su opterećeni silom u osloncu prema jednadžbi (168). Dopušteno naprezanje vijka prema [15] iznosi

$$\sigma_{\text{dop}} = 0,8 \cdot \sigma_{\text{BT}} = 0,8 \cdot 640 = 512 \text{ MPa} . \quad (183)$$

Naprezanje vijka iznosi

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{F_{Az}}{6 \cdot A_s} = \frac{2857}{6 \cdot 84,264} = 5,651 \text{ MPa} , \quad (184)$$

gdje je F_{Az} sila oslonca u z smjeru a A_s površina presjeka vijka preko kojeg se prenosi naprezanje prema izrazu

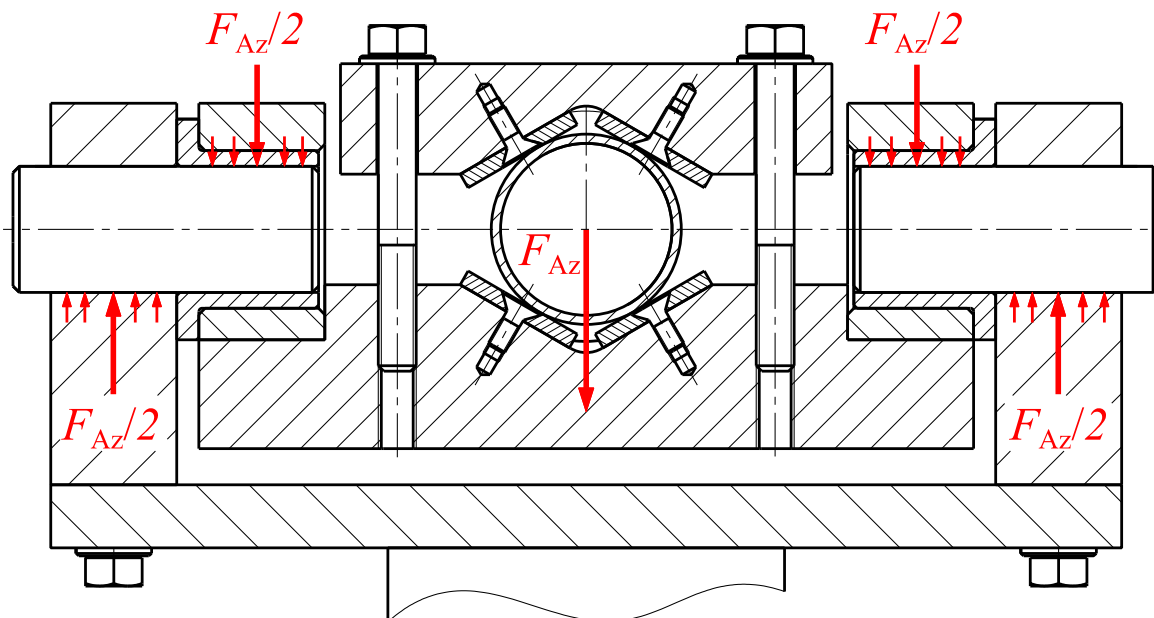
$$A_s = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d_{B2} + d_{B3}}{2} \right)^2 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{10,863 + 9,853}{2} \right)^2 = 84,264 \text{ mm}^2 . \quad (185)$$

Možemo vidjeti da je naprezanje manje od dopuštenog naprezanja, stoga vijčani spoj zadovoljava definiranu sigurnost

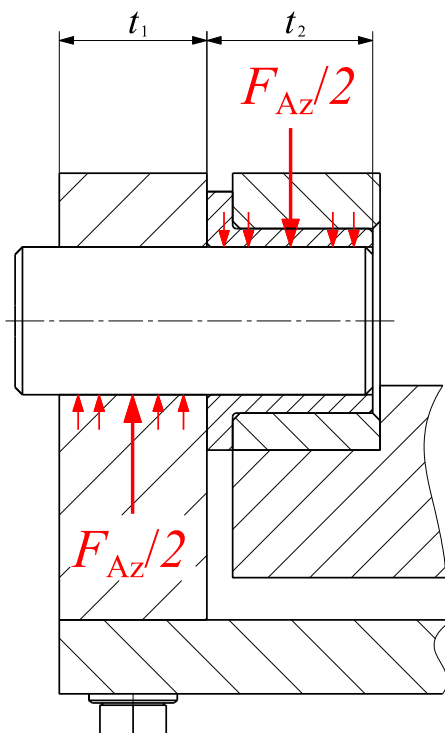
$$\sigma_{\text{max}} \leq \sigma_{\text{dop}} . \quad (186)$$

7.2.4.5 Kontrola osovine

Oslonac je uležišten između dvije osovine (slika 30.) te opterećen reakcijskom silom oslonca F_{Az} . Slika 31. prikazuje opterećenje jedne osovine na kojoj ćemo vršiti kontrolu. Kontakt između osovine i nosača te osovine i kliznog prstena je labavi dosjed.



Slika 30. Skica opterećenja oslonca



Slika 31. Skica opterećenja osovine

Potrebno je kontrolirati osovinu na naprezanje na savijanje prema izrazu

$$\sigma_f = \frac{M_{f,\max}}{W} \leq \sigma_{\text{dop}} , \quad (187)$$

gdje je $M_{f,\max}$ maksimalni moment savijanja a W aksijalni moment otpora osovine prema [14] dan izrazom

$$W = \frac{\pi}{32} \cdot d^3 = \frac{\pi}{32} \cdot 40^3 = 6,283 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 , \quad (188)$$

u kojemu je d , promjer osovine koji prema konstrukciji iznosi 40 mm.

Iznos maksimalnog savojnog momenta iznosi

$$M_{f,\max} = M_{A,\max} = \frac{F_{Az}}{2} \cdot \frac{t_1}{2} = \frac{2857}{2} \cdot \frac{0,04}{2} = 28,57 \text{ Nm} , \quad (189)$$

gdje je F_{Az} , reakcijska sila u osloncu prema jednadžbi (168) koja iznosi 2857 N a t_1 , širina nosača osovine koja prema konstrukciji iznosi 40 mm.

Prema jednadžbi (190) iznos naprezanja na savijanje iznosi

$$\sigma_f = \frac{M_{f,\max}}{W} = \frac{2,857 \cdot 10^4}{6,283 \cdot 10^3} = 4,547 \text{ MPa} . \quad (190)$$

Materijal osovine je S275JR a njegova granica razvlačenja na savijanje iznosi 360 MPa što bi značilo da je faktor sigurnosti osovine

$$S = \frac{R_{ef}}{\sigma_f} = \frac{360}{4,547} = 79 \quad (191)$$

Kao što možemo vidjeti prema proračunu cijeli uređaj je napravljen predimenzionirano s ciljem ispitivanja većih prirubničkih spojeva te samim time većih momenata i sila.

8 ZAKLJUČAK

Standardni prirubnički spoj koristi se unutar procesno-energetske industrije preko 80 godina [1]. Međutim, zbog velike učestalosti upotrebe takvih spojeva, kao i zahtjevima za sve većom operativnom efektivnošću dolazi do brojnih problema. Svakim danom standardi kvalitete rastu a očekuje se sve veća kvaliteta takvih spojeva. Proizvođači, ali isto tako i akademska zajednica, sve više rade na rješavanju brojnih problema vezanih uz prirubničke spojeve.

Problemi čvrstoće, progiba, propuštanja, težine i cijene vezani su uz brojne međusobno ovisne faktore koji svakim danom dobivaju sve veću važnost.

Jedan od bitnih problema s kojim se procesno-energetska industrija susreće je unos vanjskog statičkog savojnog momenta u cijevni i prirubnički sustav. Ovakvi problemi posebice su brojni u velikim i dugačkim cjevovodima.

U radu je provedena razrada i koncipiranje uređaja za ispitivanje prirubničkih spojeva pod utjecajem statičkog savojnog momenta. Kao konačno rješenje obrađen je koncept baziran na realnom mehaničkom modelu slobodnog i čvrstog oslonca s unosom savojnog momenta putem vijčanog uređaja na varijabilnom kraku. Dodatna mogućnost uređaja je u ispitivanju različitih veličina prirubničkih spojeva.

Također na uređaju (upotrebom vijaka) predviđena je blokada rotacije svakog oslonca, ostvarujući uklještenje oslonaca i mijenjajući način, mogućnosti i vrstu ispitivanja.

Uređaj je koncipiran s realnom mogućnošću upotrebe i izrade na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu te je dodatno ekonomski prihvatljiviji.

Kao nastavak analize i rada predlaže se izrada uređaja za ispitivanje prirubničkih spojeva pod utjecajem savojnog momenta, kao i izvođenje ispitivanja zadanog prirubničkog spoja s prirubnicom grla DN50, normiranoj nazivnim pogonskim tlakom od 40 bara. Uz ispitivanje prirubničkog spoja bilo bi potrebno pratiti i analizirati naprezanje i pomak prirubnice te iznos sile u vijcima prirubničkog spoja. U konačnici, prirubnički spoj bi bilo korisno analizirati metodom konačnih elemenata te validificirati vrijednosti analize konačnim elementima s dobivenim ispitnim vrijednostima.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

LITERATURA

- [1] Institution of mechanical engineers: Bolted Flanged Joints: New Methods and Practices, Newcastle, Velika Britanija, 2010
- [2] EN 1092-1:2008-09
- [3] Bickford, J. H.: Osnove u konstruiranju i ponašanju vijčanih spojeva, Taylor & Francis, 2007.
- [4] Nash, D.H.; Abid, M.: Combined external load test for standard and compact flanges, Department of Mechanical Engineering, Universiti of Straclyde, Glasgow, Škotska, 2001.
- [5] Instron, www.instron.us
- [6] <http://www.verax.se/>
- [7] Mathan, G.; Prasad Siva N.: Studies on gasketed flange joints under bending with anisotropic Hill plasticity model for gasket, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India
- [8] Blick, R. G. : Bending Moments and Leakage At Flanged Joints, 1950
- [9] Kerkhof, W.P.: New Stress Calculations and Temperature Curves For Integral Flanges, Nizozemska, 1951.
- [10] Koves, W.J.: Bolted-Flange Joints and Connections, 2009
- [11] BS EN 13445-3:2009
- [12] www.hbm.com
- [13] HBM - KMR <http://www.hbm.com/en/menu/products/transducers-sensors/force/kmr/>
- [14] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1988.
- [15] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.
- [16] Horvat, Z i suradnici: Vratilo (proračun), Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [17] Herold, Z.: Računalna i inženjerska grafika, Zagreb, 2003.
- [18] Opalić, M.; Kljajin, M.; Sebastijanović, S.: Tehničko Crtanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.